

**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA
LA MOLINA**

FACULTAD DE INGENIERÍA AGRÍCOLA



**“APORTES DE LA FORMACIÓN EN INGENIERÍA AGRÍCOLA EN
EL ÁREA DE SANEAMIENTO Y EN LAS TÉCNICAS DE
SEPARACIÓN SOLIDO-LÍQUIDO”**

**TRABAJO DE SUFICIENCIA PROFESIONAL
PARA OPTAR EL TÍTULO DE
INGENIERO AGRÍCOLA**

DOUGLAS JAVIER LUIS URIBE NAVARRO

LIMA – PERÚ

2020

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA

FACULTAD DE INGENIERÍA AGRÍCOLA

**“APORTES DE LA FORMACIÓN EN INGENIERÍA AGRÍCOLA EN EL
ÁREA DE SANEAMIENTO Y EN LAS TÉCNICAS DE SEPARACIÓN
SOLIDO-LIQUIDO”**

TRABAJO DE SUFICIENCIA PROFESIONAL PARA OPTAR EL TÍTULO DE:

INGENIERO AGRÍCOLA

Presentado por:

DOUGLAS JAVIER LUIS URIBE NAVARRO

Sustentado y aprobado por el siguiente jurado:

Arq. VÍCTOR FILIBERTO AGUILAR VIDANGOS
Presidente

Mg. Sc. ROSA MARÍA MIGLIO TOLEDO
Asesor

Mg. Sc. ALFONSO CERNA VÁSQUEZ
Miembro

Mg. Sc. JÓRGE LUIS DÍAZ RIMARACHIN
Miembro

LIMA – PERU

2020

DEDICATORIA

“En agradecimiento a mis padres y hermana por su amor infinito y su apoyo incondicional”

ÍNDICE GENERAL

I. PRESENTACIÓN	1
1.1. Descripción de las funciones desempeñadas y su vinculación con campos temáticos de la carrera profesional	1
1.2. Descripción de aspectos propios de la puesta en práctica de lo aprendido durante los cinco años de estudio	3
1.2.1. Tratamiento de agua potable.....	4
1.2.2. Tratamiento de agua residual domestica	8
1.2.3. Tratamiento de agua residual industrial.....	16
1.2.4. Tratamiento de efluentes mineros y metalúrgicos (Clarificadores).....	24
2.2.1. Sedimentación industrial en minería (Espesadores).....	35
II. INTRODUCCIÓN	46
III. OBJETIVO	47
IV. CUERPO DEL TRABAJO	48
4.1. Caso 1: Ampliación PTAP El Milagro Cajamarca.....	48
4.2. Caso 2: PTARI Minka DAF	57
4.3. Caso 3: Piloto Espesador de pasta para relaves UM El Porvenir Nexa	64
V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	75
5.1. Conclusiones	75
5.2. Recomendaciones	75
VI. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	76

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Malla curricular y el Tratamiento de agua potable.....	9
Tabla 2: Malla Curricular 2001 y Tratamiento de agua residual domestica	15
Tabla 3. DS N°010-2019-VIVIENDA Anexo 1	19
Tabla 4. DS N°010-2019-VIVIENDA Anexo 2.....	19
Tabla 5: Malla Curricular 2001 y Tratamiento de agua residual industrial.....	24
Tabla 6: Malla Curricular 2001 y Tratamiento de efluentes mineros y metalúrgicos	36
Tabla 7: Malla Curricular 2001 y Sedimentación industrial(espesadores).....	45

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: PTAP El Milagro Cajamarca	5
Figura 2: Construcción de losa PTAP El Milagro Cajamarca.....	6
Figura 3: Propia C.N. Poyeni Satipo-Pasco.....	7
Figura 4: PTARD Megacentro Lurin	11
Figura 5: PTARD Lindley Huachipa.....	13
Figura 6: Filtro prensa PTAR Morococha.....	14
Figura 7: SBR PTAR Morococha.....	15
Figura 8. Tamiz rotativo	21
Figura 9. DAF Terminal Pesquero Ventanilla.....	22
Figura 10. Planta lodos activados	23
Figura 11. Clarificador Primario PTAR La Enlozada	25
Figura 12. Planta piloto tratamiento de efluentes minero-metalúrgicos.....	27
Figura 13. Espesador de Relaves Proyecto Toromocho	28
Figura 14. Clarificador de contacto de sólidos Westech	29
Figura 15. Muestras efluente minero, AMD.....	31
Figura 16: Solubilidad de los hidróxidos de metales en función al pH.....	31
Figura 17. Cambio de cabezal bomba dosificadora durante piloto	34
Figura 18. Tanque de concreto clarificador primario	35
Figura 19. Componentes de un Espesador Westech.....	37
Figura 20: Relavera UM El Porvenir Pasco	39
Figura 21. Pruebas de polímero	40
Figura 22. Prueba de concentración de sólidos óptima	41
Figura 23. Tanque elevado	43
Figura 24. Tanque anclado	43
Figura 25. Unidad de accionamiento electromecánica Westech	44
Figura 26. Presedimentador.....	49
Figura 27. Cámara Mezcla rápida.....	49
Figura 28. Trident HS Westech Inc.	52
Figura 29. Ambiental y eléctrico en mediciones de campo.....	53
Figura 30. Línea de retrolavado Trident HS.....	54
Figura 31 .Instalación falso fondo	55

Figura 32. Barredor de lodos fuera de posición.	56
Figura 33. PTARI Subterránea Minka 1.....	58
Figura 34. Descarga de DAF a PTARI subterránea	59
Figura 35. Filtro prensa automatizado.....	61
Figura 36. Instalación tubería embebida en malla de losa.....	62
Figura 37. PTARI Minka 1.....	63
Figura 38. Tanque de floculante	67
Figura 39. Bombas de alimentación y flujo inferior.....	67
Figura 40. Material previo a bomba	69
Figura 41. Material luego de bomba peristáltica	69
Figura 42. Líneas de HDPE.....	72
Figura 43. Variador de frecuencia de la unidad de accionamiento	73
Figura 44. Planta piloto de pasta	74

I. PRESENTACIÓN

El mercado laboral peruano está en constante transformación, con condiciones deterioradas y en mi opinión muchas veces con ausencia de meritocracia. Se hace necesario así, desarrollar un alto nivel de adaptabilidad a los diferentes escenarios que se podrían enfrentar cuando se sale en búsqueda de una oportunidad para desarrollarse profesionalmente.

El presente trabajo tiene como intención mostrar las ventajas competitivas de la formación de un ingeniero agrícola de la Universidad Agraria La Molina en el área de saneamiento y en las técnicas de separación sólido-líquido frente a formaciones más puristas o específicas como son las ingenierías química, mecánica, sanitaria, ambiental u otras, gracias a la convivencia de sus tres departamentos académicos. No se desarrollará una comparación específica con cada una de estas especialidades, sin embargo, el lector estará en la capacidad de verificar como es que la formación holística de un ingeniero agrícola lo coloca en una posición privilegiada para hacer frente a los diversos retos que se presentan en estas áreas de estudio, tomando el rol expeditamente de líder integrador del proyecto.

1.1. Descripción de las funciones desempeñadas y su vinculación con campos temáticos de la carrera profesional

Actualmente me desempeño como ingeniero de aplicaciones en una organización que ofrece soluciones/equipos para el tratamiento de agua para uso potable, tratamiento para agua residual doméstica e industrial, separación sólido-líquido y tratamiento biológico en los mercados municipal, industrial y minero.

En mi experiencia profesional previa, me desempeñé como ingeniero de proyectos en una organización con una división especializada en el tratamiento integral de aguas y residuos industriales líquidos (RILES), instalación, puesta en marcha, operación, mantenimiento y venta de sistemas y equipos de tratamiento de agua, así como consultoría y caracterización de agua.

Anteriormente ocupe el cargo de Coordinador de operaciones para una pequeña empresa donde los proyectos en tratamiento de agua servían como fuente para desarrollar proyectos de riego. También fui contratado como supervisor ambiental junior en una empresa dedicada a la mediana minería de oro, en donde fui responsable del diagnóstico de plantas de tratamiento de aguas residuales y potable, así como de la red de saneamiento. Además, fui responsable de la supervisión de la operación del sistema de tratamiento de efluentes mineros.

Inicie mi carrera profesional en el área de saneamiento como consultor técnico para una pequeña empresa donde se desarrollaba un proyecto de diseño y construcción de una planta móvil de tratamiento de agua para zonas rurales y casos de emergencia, el proyecto desarrolló en conjunto con el programa Innóvate Perú, y en él ocupe el cargo de jefe de investigación. Además, se ofrecían sistemas de tratamiento para zonas remotas haciendo uso del bombeo solar.

Cualquier proyecto en saneamiento o separación sólido-líquido parte de la definición de tres aspectos básicos: la cantidad de fluido a procesar, los parámetros de entrada del fluido a tratar y las metas a cumplir con los parámetros de interés del cliente. Para estimar la cantidad de fluido a procesar es necesario tener una sólida formación en mecánica de fluidos, comprender el comportamiento del fluido en reposo y en movimiento. Además, si fuera el caso, será necesario también llevar a cabo un estudio hidrológico o hidrogeológico si la fuente a explotar así lo exige y/o un balance hídrico y de masa, en el caso de desarrollar proyectos de sedimentación en minería.

Una vez identificado el caudal a procesar y su comportamiento en el tiempo es preciso empezar a planificar el transporte de ese caudal desde el punto de inicio del proceso (a través de los equipos o infraestructura que harán el tratamiento o separación como tal) hasta el punto requerido por el cliente, sea como insumo para el siguiente proceso o disposición final de la fase sólida y líquida por separado.

Es importante estar en la capacidad de entender el comportamiento de los fluidos con altas concentraciones de sólidos, como los que se pueden encontrar en la industria minera y

comúnmente son llamados pulpas.

Los proyectos de saneamiento y separación solido-liquido son además casi siempre acompañados de obra civil, el diseño de obras hidráulicas, como canales, hacen que los conocimientos en hidráulica y en construcción sean muy valorados. La estimación del área necesaria, la diferencia de cotas, la propuesta de las losas requeridas para la instalación de equipos, tanques de concreto y otros conceptos relacionados a obras civiles son muy comunes en proyectos de esta naturaleza. Es también importante recurrir a los conocimientos básicos de estática, cálculo estructural y materiales de construcción cuando se usan de tanques en acero o fibra de vidrio, por ejemplo.

Por otro lado, la instalación y montaje de equipos fuerzan al responsable del proyecto a hacer uso de sus conocimientos en mecánica y electricidad. Grandes arreglos de engranajes forman parte de los equipos requeridos en el espesamiento de efluentes minero-metalúrgicos por lo que comprender el funcionamiento de estos es obligatorio. Estimar la potencia requerida por los equipos a instalar y su evaluación son aspectos esenciales a tomar en cuenta para confirmar la viabilidad del proyecto. Es importante también conocer el funcionamiento de equipos como bombas, unidades de accionamiento para mecanismos de espesadores y clarificadores, instrumentación, PLCs, variadores, etc., además eventualmente se concibe la necesidad de incorporar un grupo electrógeno por lo que es importante tener algún conocimiento básico sobre su funcionamiento. Para instalaciones de pequeñas dimensiones el bombeo solar se presenta como una excelente alternativa por lo que es siempre importante tener algún tipo de conocimiento base sobre la tecnología.

1.2. Descripción de aspectos propios de la puesta en práctica de lo aprendido durante los cinco años de estudio

A lo largo de mi vida laboral he tenido la oportunidad de participar en diferentes tipos de proyectos y en sus diversas etapas; dimensionamiento, instalación, montaje, puesta en marcha, operación, diagnóstico y estudio piloto, los cuales se podrían agrupar por el proceso estudiado de la siguiente manera:

- Tratamiento de agua potable

- Tratamiento de agua residual domestica
- Tratamiento de agua residual industrial
- Tratamiento de efluentes mineros-metalúrgicos
- Sedimentación industrial en minería (Espesadores)

Cada uno de ellos, demanda el uso de diferentes disciplinas académicas, pero al mismo tiempo presentan necesidades comunes respecto a las materias que se deben dominar para desenvolverse satisfactoriamente en cualquiera de sus etapas. A continuación, una pequeña descripción de mi experiencia en cada uno de ellos y su relación con los cursos de la malla curricular 2001.

1.2.1. Tratamiento de agua potable

Los proyectos de agua potable se inician con el estudio de la fuente en cantidad y calidad. La participación del profesional agrícola se puede dar tanto en la elaboración del expediente técnico, como en el equipamiento e integración de la solución propuesta en campo, para ambos casos es indiscutible contar con capacidad de interpretación de datos hidrológicos, hidráulicos y de calidad de agua al momento de definir o hacer una recomendación sobre infraestructura y equipos.

Comprender la naturaleza de la cuenca a la cual pertenece la fuente es también una herramienta útil pues define la calidad y cantidad del caudal disponible.

Definidos la calidad y cantidad del caudal disponible, se inicia el estudio de las estructuras hidráulicas que nos permitirán recolectar el caudal designado.

Barrajes, bocatomas, desarenadores y otro tipo de infraestructura hidráulica con errores de diseño podrían ser origen de problemas tanto en la calidad como en cantidad de agua a tratar. Además, la conducción de esta debe también ser fuente de atención, sea presurizada o haciendo uso de canales abiertos, es pieza esencial dentro del proceso de potabilización. Con datos de calidad de agua a tratar y con los objetivos según norma DS N°031-2010-SA Reglamento de la Calidad del Agua para Consumo Humano se procede a seleccionar el tipo de proceso y la infraestructura y/o equipos que serán necesarios para cumplirla. En mi

experiencia, el tratamiento fisicoquímico, sedimentación y filtración son las etapas más comunes en casi todas las instalaciones supervisadas o instaladas.

La dosificación de químicos es función de la concentración de los parámetros de interés, su relación está definida por la masa de estos en un volumen determinado de agua. El fin de cualquier equipo o infraestructura en tratamiento de agua es separar los sólidos del agua, con este fin se involucra el uso de químicos coagulantes y floculantes lo cuales fomentan la aglomeración de las partículas facilitando su separación a través de la sedimentación o filtración.

Es preciso calcular la velocidad con que estas partículas se separan pues tendrá una repercusión directa en el tamaño de los equipos o infraestructura necesaria para el tratamiento. Es así como cálculos como tasas de sedimentación, tiempos de residencia hidráulica y otros definen por ejemplo el tamaño de un sedimentador y por lo tanto el tamaño de los tanques en el caso de plantas fabricadas en acero, como la mostrada en la Figura 1, o la obra civil para grandes caudales a tratar. Así, los conocimientos adquiridos en procesos construcción y cálculos estructurales toman relevancia. Así el profesional agrícola no participe activamente en el diseño y construcción de este tipo de infraestructura, se hace indispensable, por igual, estar en la capacidad de comprender el impacto que sus diferentes particularidades pueden tener sobre el sistema en su conjunto y/o el costo total del proyecto.



Figura 1: PTAP El Milagro Cajamarca

Las obras civiles son parte de casi todos los proyectos de potabilización de agua desde el dimensionamiento y construcción de infraestructura hidráulica para grandes instalaciones, como la mostrada en la Figura 2, hasta la preparación de un poco de mortero para fijar las bases de un techo en alguna instalación rural, o un pequeño dado para el anclaje de los equipos, los conocimientos adquiridos en los cursos del departamento de O.T. y construcción le dan al ingeniero agrícola muchas más herramientas frente a otras especialidades de ingeniería y le permite sentirse mucho más cómodo trabajando en este tipo de proyectos.



Figura 2: Construcción de losa PTAP El Milagro Cajamarca

Culminadas las obras civiles, la etapa de montaje e instalación de equipos inicia. Es aquí donde los cursos dictados por el departamento de mecanización y energía adquieren protagonismo.

El primer paso consiste en hacer el cálculo de la potencia total de los equipos a instalar y verificar la disponibilidad de esta potencia en campo. También se debe verificar que la tensión y fases de los equipos a instalar corresponda con lo disponible en el proyecto. Además, si fuera el caso se deberá redactar la filosofía de control, la cual será el punto de partida para la automatización del proceso. La filosofía de control es la base para la programación en un PLC convirtiéndose este en el centro de control del sistema.

Comprender los principios mecánicos de cada uno de los equipos y sus requerimientos en energía es obligatorio para este tipo de proyectos.

Familiarizarse con los arreglos de tableros de control y fuerza y sus elementos como variadores, llaves térmicas contactores y otros es un requisito para liderar procesos de instalación y montaje.

Conocimientos en instrumentación, son también una herramienta muy valiosa pues permite el entendimiento de los equipos de monitoreo usados para verificar la calidad de agua tratada y sin tratar.

Es evidente la ventaja competitiva de un ingeniero agrícola en la comprensión de los elementos descritos frente a otras disciplinas de ingeniería normalmente involucradas en proyectos de potabilización de agua como podrían ser la sanitaria, química, mecánica y otras.

El ingeniero agrícola además tiene la posibilidad de participar en pequeños proyectos de tratamiento de agua donde no se tenía acceso a la red y los arreglos fotovoltaicos son la única alternativa de energía para la operación de los equipos. Mi experiencia en este tipo de proyectos se dio en la comunidad nativa de Poyeni.



Figura 3: Propia C.N. Poyeni Satipo-Pasco

La convivencia entre muchas disciplinas académicas les da a los ingenieros agrícolas una gran ventaja en el desarrollo de este tipo de proyectos.

El profesional agrícola también se encuentra en la capacidad de liderar equipos de técnicos operarios de plantas en funcionamiento en donde la inspección de los elementos arriba descritos permite desarrollar un análisis integral de las instalaciones. Mi experiencia, se dio como líder de tres servicios de operación y mantenimiento, supervisando a 21 empleados. La Tabla 1, muestra los cursos de la malla 2001 con mayor aporte en conocimientos para enfrentar en este tipo de proyecto.

1.2.2. Tratamiento de agua residual domestica

Mi experiencia se basa en proyectos de montaje, instalación y puesta en marcha de plantas para pequeñas poblaciones, aisladas y sin acceso al servicio de alcantarillado, usando estructuras en fibra de vidrio, denominadas comercialmente como plantas compactas.

Los usuarios finales para los que fueron desarrollados este tipo de proyectos en su mayoría eran empresas mineras e industrias diversas cuyas instalaciones o centro de operaciones está en alguna ubicación remota o la calidad de agua residual a tratar se encuentran por sobre los valores máximos admisibles.

El origen de estas oportunidades comerciales se encuentra en el marco legal al que este tipo de empresas deberán adecuarse para poder desarrollar sus actividades. Dependiendo de su ubicación o del uso que le darán al efluente tratado se verán en la obligación de cumplir con los límites máximos permisibles conforme al Decreto supremo 003-2010-Minam, los parámetros exigidos para poder ubicarse dentro de los Estándares de calidad Ambiental para agua en la categoría 3 conforme al Decreto Supremo N°004-2017-MINAM si deseara hacer el reúso del efluente tratado para el riego de vegetales y bebida de animales o el cumplimiento de los valores máximos admisibles según Decreto Supremo N°010-2019-VIVIENDA en caso de tener acceso a una red de alcantarillado.

Tabla 1: Malla curricular y el Tratamiento de agua potable

Mecanización y energía	Ordenamiento Territorial y Construcción	Recursos hídricos
Circuitos y maquinas eléctricas	Análisis estructural I	Aguas subterráneas
Instalaciones eléctricas y Electromecánicas	Concreto reforzado	Estructuras hidráulicas i
Instrumentación electrónica	Dibujo en ingeniería	Gestión del agua
Maquinaria para obras	Energías renovables	Hidráulica
Motores y tractores	Materiales de construcción	Hidrología
Termodinámica	Mecánica de suelos	Ingeniería del agua y medio ambiente
	Programación y supervisión de obras	Manejo y gestión de cuencas
	Proyectos de inversión	Mecánica de fluidos
	Resistencia de materiales	
	Abastecimiento de agua potable	
	Técnicas de la construcción	

Confirmado el marco legal al que deberá adecuarse el cliente y con ello las metas para el efluente tratado, se hace necesario calcular el caudal a tratar. Este dependerá de la población a servir, si las instalaciones complementarias del sistema de tratamiento ya fueron construidas y del tipo de instalaciones generadoras de agua residual. Un ejemplo de cómo es que las condiciones iniciales de un proyecto afectan el diseño de una planta de tratamiento de agua residual domestica podría ser la construcción de un campamento minero. Si la construcción del campamento está en estudios de ingeniería conceptual existe la posibilidad de hacer una distinción entre efluentes con carga orgánica muy alta y desechos fisiológicos propios de la actividad humana y aquellos que no los contienen, muy baja carga orgánica o cuyo origen se encuentra en actividades conexas a las actividades humanas, como son lavanderías, comedores, duchas y otras, actividades de gran volumen de agua, pero exigen una menor complejidad en su tratamiento. Durante el estudio de factibilidad se puede proponer hacer líneas paralelas y así poder optar por dos tipos de tratamiento diferentes dependiendo del análisis técnico-económico del proyectista.

En el caso de que el efluente ya esté siendo generado, se deberá planificar y ejecutar un plan de monitoreo del análisis de la calidad de agua con el fin de identificar sus componentes, además deberá monitorearse el caudal, con ambos quedaran definidos los datos de entrada para la siguiente etapa de estudio.

Definidas las características del efluente a tratar sea por una estimación usando normas técnicas peruanas para la construcción de este tipo plantas o a través del desarrollo de un plan de monitoreo y análisis de la calidad de agua junto con la confirmación de la población a servir, se podrá finalmente obtener el caudal y la calidad de agua a tratar, con ello se efectúa el estudio del tipo de proceso a aplicar para el tratamiento del efluente.

Existen una gran variedad de alternativas para el tratamiento de aguas residuales domesticas entre las cuales tenemos:

- Cribas
- Tanques Imhoff
- Tanques de sedimentación
- Tanques de flotación
- Lagunas de estabilización
- Lagunas anaerobias
- Lagunas airadas
- Lagunas facultativas
- Lodos activados
- Zanjas de oxidación
- Filtros percoladores
- Sistemas biológicos rotativos de contacto

El análisis para la elección de una de estas soluciones o un conjunto de estas dentro de un sistema donde normalmente se definen tratamientos por etapas entre primarios, secundarios y terciarios, deberá efectuarse siguiendo la norma técnica peruana y el marco legal correspondiente, así como el análisis financiero del proyecto y la evaluación de las metas del usuario final.

Como se mencionó, mi experiencia se basa en proyectos para pequeñas poblaciones. El arreglo general por el que optaba tanto el cliente como el grupo técnico encargado del análisis del proceso implicaba el uso de una planta de tratamiento de agua residual domestica compactas por lodos activados como la mostrada en la Figura 4.



Figura 4: PTARD Megacentro Lurin

Este tipo de planta fabricada en fibra de vidrio se compone de tres compartimientos separados dentro de un mismo tanque, el primero hace la función de ecualizador encargado principalmente de soportar los picos de caudal o carga orgánica que se dan durante un día regular de operación, el segundo compartimiento es donde el tratamiento se da, este compartimiento sirve como reactor en donde se fomenta el crecimiento de bacterias a través de la aireación extendida para formar los llamados lodos activados, es en esta cámara donde se consume la carga orgánica y se separan los sólidos del agua. La tercera cámara sirve como sedimentador en donde el agua clarificada luego de su tratamiento tiene suficiente tiempo de como para que aquellas partículas que aún se encuentre en suspensión puedan decantar finalmente para obtener un producto con menor carga de sólidos, luego del sedimentador el efluente tratado pasa por algún tipo de filtro de media o disco en donde las partículas más pequeñas son separadas y por ultimo pasa a una cámara de contacto en donde se dosifica hipoclorito de sodio o algún otro agente desinfectante para cumplir con los limites requeridos

por el cliente.

Para el diseño de cada una de las etapas del proceso existen diferentes guías, mucho material académico de consulta en línea y hasta hojas de cálculo prediseñadas. El tratamiento de aguas residuales domesticas por lodos activados es uno de los más comunes y su aprendizaje no representa un gran desafío con la base en hidráulica dentro del formación de un ingeniero agrícola de la Universidad Agraria La Molina.

Con el diseño definido, se generan los planos de fabricación y se encarga la fabricación a algún proveedor experto en fibra de vidrio, el cual será responsable del análisis estructural más a detalle de los tanques y en coordinación con el ingeniero responsable elaborará una propuesta para ser aprobada por todas las partes involucradas y finalmente proceder con la fabricación.

El proceso también requiere se dimensionen los equipos necesarios para mover el caudal dentro y fuera del tanque y filtros si fuera el caso, se asegure el caudal de aire necesario para el tratamiento y se dosifique correctamente el insumo químico desinfectante. Bombas sumergibles, sopladores y bombas dosificadoras deberán seleccionarse de acuerdo con el diseño de la planta. Todos los equipos además deberán integrarse y funcionar sin necesidad de la intervención de un operador permanentemente. Se redacta la filosofía de control y se encarga la programación en un PLC, así como la integración en un tablero general de fuerza y control. Es en esta etapa donde los conceptos aprendidos en los cursos de mecanización y energía toman protagonismo.

Con la selección de equipos y el tanque fabricado se podrá proceder con el montaje e instalación de los equipos en campo, para ello será necesario la construcción de una losa donde los equipos y tanque serán fijados. Una correcta coordinación con el responsable de la obra civil sea el cliente o un tercero aseguran que la losa sea correctamente construida. El cálculo de las cargas, el análisis del tipo de suelo y hasta una posible complicación por el nivel freático deberán serán tomados en cuenta. Para todos los aspectos de esta etapa del proceso es muy fácil para un ingeniero agrícola cruzar información con el contratista, sugerir cambios y verificar que la losa sea correctamente diseñada y construida.

Finalmente, el conjunto de equipos, tanque y losa se puede observar en la Figura 5, como producto finalmente entregado listo para la operación y el tratamiento del agua residual doméstica.



Figura 5: PTARD Lindley Huachipa

Además, mi experiencia también se basa en el rol de líder responsable de la correcta operación de plantas de tratamiento de agua residual doméstica para poblaciones medianamente grandes. La antigua organización de la que formaba parte ofrecía el servicio de operación de todo tipo de plantas de tratamiento de agua dentro de las cuales se encontraban las residuales domésticas. Los procesos para adjudicarse este tipo de negocio normalmente iniciaban con una invitación a un concurso de licitación en donde empresas preseleccionadas en cumplimiento con las exigencias del cliente en cuanto a capacidades operativas, experiencia, sistemas de gestión, perfil financiero y otros competían entre sí para adjudicarse un contrato de entre 3 meses a varios años de duración.

El personal operativo designado por la adjudicada deberá acreditar su conocimiento para operar equipo especializado como el mostrado en la Figura 6, es este personal los principales de responsables de brindar exitosamente el servicio, es necesario el máximo cuidado en su selección.



Figura 6: Filtro prensa PTAR Morococha

Dependiendo de las obligaciones legales del cliente respecto a la calidad de agua tratada el ganador de dichos concursos tendría que hacerse responsable del tratamiento satisfactorio de acuerdo con los límites máximos permisibles conforme al Decreto supremo 003-2010-MINAM, los parámetros exigidos para poder ubicarse dentro de los Estándares de calidad Ambiental para agua en la categoría 3 conforme al Decreto Supremo N°004-2017-MINAM o el cumplimiento de los valores máximo admisibles según Decreto Supremo N°010-2019-VIVIENDA en caso de tener acceso a una red de alcantarillado, además el ganador del contrato es responsable del monitoreo tanto del agua a tratar como la tratada y su reporte a hacia la organización contratante o ante la autoridad fiscalizadora gubernamental.

Una de las instalaciones más grandes en la que pude liderar el equipo de operación, fueron las plantas de tratamiento de agua potable y residual de la Nueva Ciudad de Morococha, diseñada para tratar $2000\text{m}^3/\text{día}$, compuesta por un tamiz para la separación de solidos gruesos y tratamiento por lodos activados a través de un SBR, mostrado en la Figura 7.

Al igual que los proyectos de agua potable, la ventaja competitiva de un ingeniero agrícola frente a otras especialidades que lideran este tipo de proyectos y servicios, está en lo multidisciplinario de su formación académica.



Figura 7: SBR PTAR Morococha

La Tabla 2 muestra los cursos de la malla 2001 con mayor aporte en conocimientos para enfrentar en este tipo de proyecto.

Tabla 2: Malla Curricular 2001 y Tratamiento de agua residual domestica

Mecanización y energía	Ordenamiento Territorial y Construcción	Recursos hídricos
Circuitos y maquinas eléctricas	Análisis estructural I	Aguas subterráneas
Instalaciones eléctricas y Electromecánicas	Concreto reforzado	Estructuras hidráulicas i
Instrumentación electrónica	Dibujo en ingeniería	Gestión del agua
Maquinaria para obras	Energías renovables	Hidráulica
Motores y tractores	Materiales de construcción	Ingeniería del agua y medio ambiente
Termodinámica	Mecánica de suelos	Mecánica de fluidos
	Programación y supervisión de obras	
	Proyectos de inversión	
	Resistencia de materiales	
	Manejo de aguas residuales	
	Técnicas de la construcción	

1.2.3. Tratamiento de agua residual industrial

Uno de los principales desafíos para la industria actual es la explotación sostenible y el control de la contaminación de los recursos hídricos. La cantidad anual de agua utilizada por la industria está aumentando y cada vez más se compite directamente por los recursos hídricos limitados con la creciente demanda de agua para uso urbano y agrícola.

La industria es uno de los mayores contaminadores del agua, pues descarga toneladas de metales pesados, disolventes, lodos tóxicos y otros desechos cada año. Los contaminantes hacen que el agua sea mucho más difícil o en algunos casos económicamente inviable de volverla potable. Contaminan y matan peces que proporcionan una importante fuente de proteína para muchas personas, especialmente a los sectores con menor poder adquisitivo. El agua contaminada también es responsable de transferir compuestos tóxicos a la cadena alimentaria a través de su uso en la agricultura y su absorción por la vida vegetal y animal.

Para 2030, se espera que la demanda de agua supere el suministro actual en un 40%, según el Water Resources Group, una rama del Banco Mundial. Los expertos dicen que la escasez de agua no se debe únicamente al cambio climático; la escasez de agua también se debe a la mala gestión de los recursos hídricos existentes en las industrias que consumen mucha agua.

La recuperación y reutilización de fuentes de aguas residuales para el reúso en las plantas de producción, el agua para refrigeración de equipos y en procesos de soporte en general ha aumentado sustancialmente debido a los aumentos en el costo del agua potable, la escasez recurrente de agua y el aumento en la fiscalización por parte de los organismos de control gubernamental.

El agua es necesaria en casi todos los sectores industriales para el procesamiento y fabricación de productos. Las fuentes de agua cruda de alta calidad para plantas industriales son cada vez más escasas. La disponibilidad de agua de ríos y lagos no solo está disminuyendo, sino que, lo que está disponible está cada vez más regulado por organismos de fiscalización estatal como la Autoridad Nacional del Agua y el Organismo de Evaluación y Fiscalización Ambiental y/o por la autoridad local a través de los municipios y en última instancia, pero no menos importante, los propios pobladores. Este escenario ha llevado al

reúso de agua industrial tomar protagonismo como una alternativa para satisfacer la demanda de un proceso productivo en específico y en algunos casos, es la única alternativa.

Las industrias que requieren grandes sistemas de enfriamiento para la producción, como las plantas de energía y refinerías de petróleo, son los mayores consumidores industriales de agua reciclada, debido a la gran demanda de agua en sus torres de enfriamiento y calderas. Otras aplicaciones industriales incluyen perforación de petróleo y gas, refinación de petróleo, plantas químicas, refinadoras de metales, teñido de textiles y alfombras, fabricación de papel, fabricantes de cemento, producción y comercialización de comestibles, industria pesquera, entre otras.

Muchas empresas han detectado el riesgo que las crecientes limitaciones de agua podrían representar para sus operaciones y reconocen la necesidad de considerar fuentes de agua no convencionales. La tecnología, la química y los procesos existen hoy en día para integrar de manera viable y económica la reutilización del agua de fuentes no convencionales en casi cualquier aplicación de proceso industrial.

La expansión del sector industrial es fundamental para luchar contra la pobreza, la entrega de bienes y servicios, la creación de empleo y la mejora de los estándares de vida. Sin embargo, en muchos países el desarrollo industrial va de la mano con la degradación ambiental y el agotamiento de los recursos, que amenazan las oportunidades de crecimiento económico sostenible, siendo nuestro país un vivo ejemplo de esta tesis.

Una de las principales barreras que impiden que los países en desarrollo adopten estrategias de crecimiento ambientalmente responsables es la incapacidad técnica y la ausencia de un sistema adecuado de apoyo a la industria para ayudar a las empresas a desarrollarse.

Los países menos desarrollados aún no consumen lo suficiente para satisfacer sus necesidades básicas, mientras que los más desarrollados están consumiendo mucho más allá de estas necesidades. En los países de ingresos bajos, la industria representa un porcentaje muy bajo de las extracciones de agua, en comparación con enorme porcentaje que representa en algunos países de ingresos altos como Alemania. Si a esto además le sumamos la

informalidad en la que operan muchas de las empresas productoras de bienes en el Perú, el universo de posibles usuarios de equipos de tratamiento para agua industrial sea para reúso o para el cumplimiento de los valores máximos admisibles es realmente reducido.

Mi experiencia es reducida respecto a los proyectos de tratamiento de agua residual industrial, es quizás la poca presencia de establecimientos industriales una de las razones por las cuales la demanda de equipos de tratamiento de agua residual industrial no es tan grande, casi todos los proyectos en los que he tenido la suerte de participar han sido relacionados a la industria de producción y/o comercialización de comida. Este tipo de industria casi nunca centra sus objetivos en el reúso de agua pues la calidad de agua demanda por su proceso y las características de efluente final hacen que el tratamiento para regresarlo a su estado inicial sea económicamente poco atractivo. Sin embargo, este tipo de industria es foco de atención para más de una agencia gubernamental pues es vital el cumplimiento de las normas que permiten asegurar la inocuidad de los alimentos producidos o comercializados.

Así, la fiscalización de la calidad del agua residual es la principal razón para el desarrollo de un sistema de tratamiento. En mi experiencia, los tipos de industria atendidas encontraban sus obligaciones legales respecto al efluente tratado, se ajustaban al Decreto Supremo N°010-2019-VIVIENDA, Reglamento de Valores Máximos Admisibles (VMA) para las descargas de aguas residuales no domésticas en el sistema de alcantarillado sanitario, el cual define los Valores Máximos Admisibles (VMA) como la concentración de los parámetros, establecido sus Anexos N° 1 y N° 2, contenidos en las descargas de las aguas residuales no domésticas a descargar en los sistemas de alcantarillado sanitario y que puede influenciar negativamente en los procesos de tratamiento de las aguas residuales, al exceder dichos valores. Además, define agua residual no doméstica como la descarga de líquidos producidos por alguna actividad económica comercial e industrial, distinta a la generada por los usuarios domésticos, quienes descargan aguas residuales domésticas como producto de la preparación de alimentos, del aseo personal y de desechos fisiológicos.

Este documento también define los procedimientos para el monitoreo de los usuarios no domésticos (Persona natural o jurídica que realiza descargas de aguas residuales no domésticas al sistema de alcantarillado sanitario), los derechos y obligaciones de las empresas prestadoras del servicio de saneamiento y todo el marco legal respecto a las

sanciones aplicables.

Se definen también los parámetros a auditar, los encargados de fiscalizar, la definición de laboratorio acreditado y los límites para cada uno de los parámetros los cuales se muestran en los anexos 1 y 2 en las tablas a continuación.

Tabla 3: DS N°010-2019-VIVIENDA (Anexo 1)

Parámetro	Unidad	Simbología	VMA para descargar al sistema de alcantarillado
Demanda bioquímica de oxígeno	mg/l	DBO ₅	500
Demanda química de oxígeno	mg/l	DQO	1000
Sólidos suspendidos totales	mg/l	S.S.T.	500
Aceites y grasas	mg/l	A y G	100

Antes mencionado, la mayoría de los proyectos en los que se basa mi experiencia, se encuentran en la industria de la producción y comercialicen de comestibles. El agua es un recurso precioso y crucial en el proceso de producción de alimentos y bebidas. Desde el monitoreo de los parámetros de interés en el agua cruda a usar hasta el tratamiento, la eliminación de nutrientes biológicos y la recuperación de agua residual, todos los procesos involucran agua y todos son críticos para asegurar la calidad del producto final y/o la operación continua de la planta.

Tabla 4: DS N°010-2019-VIVIENDA (Anexo 2)

Parámetro	Unidad	Simbología	VMA para descargar al sistema de alcantarillado
Aluminio	mg/l	Al	10
Arsénico	mg/l	As	0.5
Boro	mg/l	B	4
Cadmio	mg/l	Cd	0.2
Cianuro	mg/l	CN-	1
Cobre	mg/l	Cu	3
Cromo hexavalente	mg/l	Cr ⁺⁶	0.5
Cromo total	mg/l	Cr	10
Manganeso	mg/l	Mn	4
Mercurio	mg/l	Hg	0.02
Níquel	mg/l	Ni	4
Plomo	mg/l	Pb	0.5
Sulfatos	mg/l	SO ₄ ⁻²	1000

«continuación»

Sulfuros	mg/l	S ⁻²	5
Zinc	mg/l	Zn	10
Nitrógeno amoniacal	mg/l	NH ⁻⁴	80
Potencial hidrógeno	unidad	pH	6-9
Sólidos sedimentables	ml/l/h	S.S.	8.5
Temperatura	°C	T	<35

(1) La aplicación de estos parámetros a cada actividad económica por procesos productivos, es la precisada en el presente Reglamento tomando como referencia el código CIIU. Aquellas actividades que no estén incluidas en este código, deben cumplir con los parámetros indicados en el presente Anexo. Los parámetros establecidos en los Anexos N° 1 y N° 2 del presente Reglamento, son determinados a partir del análisis de muestras puntuales.

(2) Las concentraciones de los parámetros establecidos en los Anexos N° 1 y N° 2 deben ser determinadas a partir del análisis de muestras puntuales.

El procesamiento de alimentos genera un gran volumen de aguas residuales. Las características y los componentes de los efluentes varían ampliamente y requieren diferentes tecnologías de tratamiento para lograr los límites de descarga requeridos.

En mi experiencia, el agua residual de la industria de producción y/o comercialización de comestibles es muy diversa en los componentes a remover, sin embargo, el conjunto de procesos más aplicados se puede resumir de la siguiente manera:

- **Tamices, rejas, cribas**

Los flujos de desechos de las plantas de producción de alimentos contienen grandes trozos de sólidos que requieren separación. El proceso más simple y económico para eliminar estos sólidos es el tamizado. Existen varios diseños de tamices y el diseño de las instalaciones debe ser una base para la selección. Los modelos incluyen tamices rotativos (Figura 8), tamices con sinfín, cribas estáticas y tamices de escalera.

El efluente filtrado se envía normalmente a un tanque ecualizador. Puede combinarse con líneas de alimentación que no requieran tamizado. La alimentación de un efluente industrial rara vez es continua en cantidad o calidad, de ahí la importancia de un tanque ecualizador. Los flujos de proceso pueden variar según el turno, el producto y los horarios de limpieza. La ecualización del caudal es casi siempre ventajosa. La ecualización del caudal de

alimentación también reduce el tamaño y el costo del equipo de tratamiento de aguas residuales.



Figura 8: Tamiz rotativo

- **Aceites y grasas**

Algunas plantas producen grandes cantidades de grasas, aceites y grasas. Una unidad de flotación por aire disuelto (DAF) es un equipo bastante eficaz para reducir los niveles de aceites, grasas y sólidos. Los DAF son especialmente efectivos para los alimentos sólidos ya que la mayoría de las partículas en la producción de alimentos flotan. Los aceites y grasas flotantes y los sólidos se extraen de la unidad DAF y se recuperan para su eliminación o venta en caso de la industria pesquera, como el mostrado en la Figura 9. Los sólidos desnatados no requieren espesamiento.

Los sólidos suspendidos totales (TSS), los aceites y grasas y la demanda biológica de oxígeno (DBO) se reducen significativamente mediante el tratamiento con un DAF. Sin embargo, todavía puede haber niveles de estos contaminantes que requerirán un tratamiento adicional antes de la descarga. El tipo y nivel de contaminante determinan las opciones de tratamiento. El volumen del flujo de residuos, las posibilidades de reutilización y el espacio disponible también influirán en la elección de los diseños de tratamiento.



Figura 9: DAF Terminal Pesquero Ventanilla

- **Tratamiento Biológico**

Casi todas las instalaciones de procesamiento de alimentos requerirán un tratamiento biológico para la eliminación de DBO. Si la corriente es pequeña o la DBO es baja, la planta puede optar por enviar los residuos filtrados a una planta de tratamiento municipal. Algunas aguas residuales contendrán DBO muy alta (lácteos, queso, etc.) y serán necesarios sistemas anaeróbicos y aeróbicos.

El tratamiento biológico aeróbico permite el control de la DBO y ayudara con la sedimentación de aquellos solidos de origen orgánico que aún se encuentran en suspensión. El proceso más usado en mi experiencia es el tratamiento por lodos activados, el cual necesita de aeración extendida para el desarrollo de organismos que transformarán la materia orgánica y permitirán el control de la demanda biológica de oxígeno. Las operaciones dentro del tratamiento biológico pueden incluir: ecualización, aireación, almacenamiento de lodos, digestión y tratamiento anóxico si fuera necesario.

Finalmente, los productos de este proceso, por un lado, el agua clarificada podría pasar por un último proceso de desinfección usando cloro si fuera necesario y finalmente a su disposición final a la red de alcantarillado. Por otro lado, los sólidos sedimentados podrían

pasar a un proceso de deshidratación final como un filtro prensa o deshidratador de tornillo, también podrían ser dispuestos y manejados por una empresa autorizada.



Figura 10: Planta lodos activados

Mi experiencia también me permitió participar como líder en servicios de operación, montaje y puesta en marcha de proyectos para el tratamiento de agua residual producto de la fabricación de baterías para autos, donde el foco estaba en la precipitación de metales pesados propios de su proceso productivo, la producción de empaques para snacks en donde también el problema principal era la precipitación de metales pesados, tratamiento del efluente producto del lavado de frutas y verduras, producción de mermeladas y otros comestibles.

De igual manera que para el tratamiento para agua potable o residual doméstica la base de los cálculos para el diseño y/o selección de equipo se encuentra en la hidráulica, además deberán efectuarse balances de masa para la estimación de carga de sólidos, orgánicos o inorgánicos y dosificación de químicos. Los equipos además poseen cierto grado de automatización, entender los principios de los instrumentos y equipos que guían están automatización es obligatorio.

Normalmente la construcción de una planta de tratamiento de aguas residuales industrial se encuentra dentro de una de las partidas de un proyecto de obra civil más grande, es por ello que, el profesional líder deberá en muchos casos ser partícipe de la toma de decisiones en

campo en cuanto al replanteo y/o modificaciones a las obras planificadas.

Es muy cómodo para un ingeniero agrícola poder interactuar con todas las disciplinas involucradas y trabajar como el integrador de todas las decisiones tomadas, además el amplio espectro de conocimientos del agrícola le permite desenvolverse como fuerza comercial para este tipo de proyectos. La Tabla 5, muestra los cursos de la malla 2001 con mayor aporte en conocimientos para enfrentar en este tipo de proyecto.

Tabla 5: Malla Curricular 2001 y Tratamiento de agua residual industrial

Mecanización y energía	Ordenamiento Territorial y Construcción	Recursos hídricos
Circuitos y maquinas eléctricas	Análisis estructural I	Estructuras hidráulicas i
Instalaciones eléctricas y Electromecánicas	Análisis estructural II	Gestión del agua
Instrumentación electrónica	Concreto reforzado	Hidráulica
Órganos de maquinas	Dibujo en ingeniería	Ingeniería del agua y medio ambiente
Mecánica vectorial i	Materiales de construcción	Ingeniería de riegos
Termodinámica	Mecánica de suelos	Ingeniería de riegos II
	Mecánica vectorial II	Mecánica de fluidos
	Programación y supervisión de obras	
	Resistencia de materiales	
	Manejo de aguas residuales	
	Técnicas de la construcción	

1.2.4. Tratamiento de efluentes mineros y metalúrgicos (Clarificadores)

Las leyes que regulan el uso del agua varían en todo el mundo, pero es justo decir que el sector minero puede esperar mucha más presión que otras industrias para su uso y gestión. El agua juega un papel esencial en la industria minera, por ello el uso responsable es un problema comercial crítico que afecta la capacidad de la organización para establecer, operar y cerrar un proyecto minero.

El uso y los impactos de la industria minera sobre el agua pueden dar lugar a una serie de riesgos ambientales, sociales y económicos. En algunos casos, las percepciones del uso elevado de agua son suficientes para causar tensiones muy reales e incluso conflictos sociales, escenarios muy comunes en nuestro país, donde comunidades cerca de los yacimientos mineros pueden ejercer mucha presión en las autoridades locales y nacionales preocupados por la disponibilidad del agua, la seguridad de su acceso y la potencial contaminación del recurso. Recordemos el tan afamado lema: “Agua si, mina no”.

Algunas compañías, aunque muy pocas en Perú, exceden el cumplimiento normativo para mantener su condición de buenos vecinos de las comunidades cercanas, como es el caso de Freeport-McMoRan Copper & Gold que opera en Perú como Sociedad Minera Cerro Verde, empresa que en coordinación con el sector público logro la recuperación del río Chili en Arequipa con la construcción de la PTAR La Enlozada (Figura 11). Existe también además la necesidad de mantener la buena reputación de la industria para asegurar el desarrollo de una posible expansión o futuro proyecto minero.



Figura 11: Clarificador Primario PTAR La Enlozada

El agua fluye a través de las fronteras regionales y en algunos casos nacionales y es utilizada por personas que pueden ser remotas de la fuente inmediata de impacto o demanda, pero parte de la cuenca donde se desarrolla el proyecto minero. Comprender y abordar estas demandas competitivas es una parte crítica de la administración del agua, un aspecto donde la ingeniería agrícola destaca como carrera profesional al contar dentro de su formación con una combinación de herramientas únicas de la especialidad para comprender la naturaleza compleja de una cuenca hidrográfica.

La gestión del agua no solo genera estrés en el marco medio ambiental o de las relaciones comunitarias, sino que además es uno de los factores más importantes en el análisis financiero de un proyecto minero, pues la disponibilidad de los recursos, el CAPEX y el OPEX necesario para usarlo y mantenerlo son aspectos de gran importancia cuando se analiza la viabilidad de un proyecto, en minería sin agua no hay negocio.

El entorno de un proyecto minero normalmente se controla cuidadosamente para garantizar el cumplimiento de la normativa y minimizar impacto a los cuerpos receptores. La descarga del efluente minero generado por el proceso de beneficio deberá ser tratado y monitoreado rutinariamente tanto por la empresa como por el ente fiscalizador pertinente, OEFA, deberá cumplir con cierta calidad estándares y requisitos en términos de temperatura, pH y conductividad y todos los parámetros dentro del marco legal. Existen otras descargas que ocurren debido a la escorrentía superficial generada por eventos de lluvia y la descarga de aguas residuales domésticas propias de la actividad humana.

En algunos casos, tipos de minerales específicos extraídos interactúan con el oxígeno y agua del ambiente para formar un tipo de efluente conocido comúnmente como “aguas ácidas”, un proceso que puede persistir mucho después cierre de minas y puede requerir una gestión continua y tratamiento. Las prácticas de gestión de estas denominadas aguas ácidas se han desarrollado mucho en la actualidad.

Para el análisis de las diferentes variables que gobiernan el papel de los recursos hídricos en la actividad minera es indispensable contar con una formación académica orientada a la hidráulica, para comprender el movimiento del agua a través de un proyecto minero, pero además cobran importancia los conocimientos en manejo de cuencas pues brindan una visión mucho más amplia de los impactos de los influentes a una operación minera y de sus efluentes luego de su uso en la cadena de valor, entender conceptos hidrológicos y como es que los eventos de lluvia y el clima podrían afectar la operación minera son también herramientas útiles para este análisis. La formación de un ingeniero agrícola calza perfectamente para realizar este tipo de tarea, pues se cuenta con todas las herramientas académicas necesarias para sentirse en plena confianza de realizar un análisis detallado y completo.

Mi experiencia se ha centrado en los efluentes mineros-metalúrgicos (Figura 12), al trabajar en compañías donde la actividad principal comercial es la venta equipos y/o la operación de plantas y sistemas existentes por lo que los caudales y calidad de entrada a los procesos ya han sido definidos por el cliente.



Figura 12: Planta piloto tratamiento de efluentes minero-metalúrgicos

El Decreto Supremo N° 010-2010-MINAM define los efluentes mineros y metalúrgicos como un flujo regular o estacional de sustancia líquida descargada a los cuerpos receptores y provee una descripción detallada de las actividades, sistemas, depósitos e infraestructura generadoras de este tipo de efluente dentro de la unidad minera.

Además, define el Límite Máximo Permisible (LMP) como la medida de la concentración o del grado de elementos, sustancias o parámetros físicos, químicos y biológicos, que caracterizan al efluente líquido de actividades minero-metalúrgicas, y que al ser excedida causa o puede causar daños a la salud, al bienestar humano y al ambiente

Las alternativas y estrategias para el cumplimiento de estos límites máximos permisibles son diversas y dependientes de la calidad de agua que cada aplicación en específico nos presente, la explotación de los minerales ofrece muchas variantes en sus métodos y sustancias usadas para la separación del metal precioso de la merma o relave, si el origen del caudal a tratar es producto del proceso de beneficio, normalmente esta pulpa posee una alta concentración de

sólidos, que podría variar entre 4 al 30% en concentración en masa, por lo que casi siempre un equipo previo se encarga de la separación de estas grandes cantidades de sólidos poniéndole énfasis en la concentración que pueden alcanzar dentro de ellos los sólidos de desecho, estos equipos casi siempre se basan en la sedimentación por gravedad y son llamados espesadores, como se muestra en la figura 13 para el proyecto Toromocho.

El fin supremo de cualquier equipo de tratamiento de agua o separación sólido-líquido, es remover justamente estos sólidos del flujo principal, para el caso de los espesadores es el caudal inferior de desecho el que dirige su dimensionamiento pues este equipo cumple un papel fundamental en la cadena de procesos involucrados en la disposición final de los sólidos de desecho o relaves.

Una vez la pulpa ha sido procesada en los espesadores, el licor o agua recuperada es el que finalmente se conoce como efluente minero-metalúrgico y su naturaleza es rica en metales disueltos y en suspensión, además de otras sustancias propias del proceso de beneficio de los minerales procesados.



Figura 13: Espesador de Relaves Proyecto Toromocho

Los equipos que tratan este efluente deberán procesar una pulpa con una concentración de sólidos mucho más diluida con un máximo del 3% en concentración de sólidos por masa y muchas veces son el último equipo por donde el efluente minero-metalúrgico deberá pasar previo a su descarga a un cuerpo receptor o su reúso para otro proceso dentro de la unidad minera. Si estos equipos no fueran capaces de alcanzar las metas en concentraciones de los

parámetros en estudio para cual sea el fin del agua tratada, la última alternativa disponible es la filtración del efluente.

Cuando se necesita la mezcla, la floculación y la sedimentación de los sólidos a desechar sea logrado en un solo tanque son los clarificadores los equipos más eficaces en lograr estas metas. Lo que se busca es la tasa de recuperación de agua más alta posible con una dosis mínima de productos químicos produciendo la mejor calidad de efluentes.

Los clarificadores son equipos diseñados para la separación de una cantidad relativamente grande de líquido de una pequeña cantidad de sólidos, con énfasis en la claridad del licor o agua recuperada.

Los clarificadores continuos (Figura 14), generalmente se emplean con suspensiones diluidas, principalmente flujos de procesos industriales y residuos municipales domésticos, y su propósito principal es producir un efluente relativamente claro. Son básicamente idénticos a los espesadores en diseño y distribución, excepto que emplean un mecanismo de construcción mucho más ligero y una unidad de accionamiento con una menor capacidad de torque. Estas diferencias se permiten en aplicaciones de clarificación porque la pulpa espesa producida es menor en volumen y sensiblemente menor en concentración de sólidos en suspensión, debido al gran porcentaje de relativamente finos (menores de $10\ \mu\text{m}$ /sólidos).

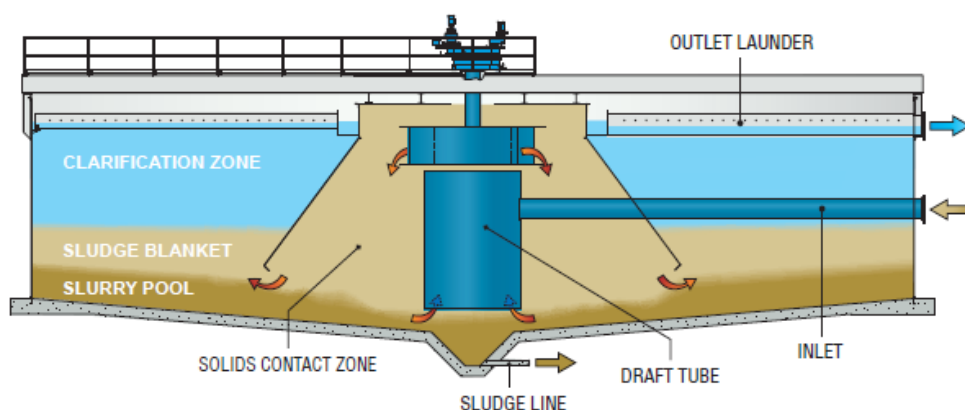


Figura 14: Clarificador de contacto de sólidos Westech

Otro tipo efluente minero-metalúrgico con el que un ingeniero agrícola en esta industria podría enfrentarse, son los denominados drenajes ácidos de mina, el cual se produce de forma natural en algunos entornos como parte del proceso de meteorización de las rocas, pero se ve agravado significativamente por la minería, generalmente dentro de rocas que contienen abundantes materiales sulfurosos. Cuando el agua entra en contacto con el azufre, crea un ácido sulfúrico. El ácido sulfúrico luego disuelve y lixivia los metales que se encuentran en el mineral, creando altas concentraciones de metales disueltos como hierro, arsénico y cadmio. A medida que el agua se expone al oxígeno, se oxida. Cuando esto ocurre, se consume todo el oxígeno del agua, lo que hace que el agua sea inhabitable para la vida acuática. Además, el óxido y los metales pesados en el agua la hacen inutilizable para toda la vida silvestre que depende de esa fuente de agua para sobrevivir. El inquietante color óxido del agua también hace que el drenaje ácido de las minas sea un objetivo fácil / principal para las autoridades ambientales de todo el mundo.

Aunque existen muchas tecnologías biológicas y químicas, diferentes para el tratamiento del drenaje ácido de las minas, AMD por sus siglas en inglés, y los efluentes de las fundiciones, la neutralización con cal sigue siendo, por mucho, el método de tratamiento más aplicado. Esto se debe en gran parte a la alta eficiencia en la eliminación de metales pesados disueltos combinado con el hecho de que los costos de la cal son bajos en comparación con las alternativas. El tratamiento con cal consiste esencialmente en llevar el pH del agua cruda a un punto en el que los metales en cuestión sean insolubles. Por tanto, estos metales se precipitan para formar partículas minúsculas. Luego se requiere una separación de estos precipitados para producir un efluente claro que cumpla con el requerimiento legal, límites máximos permisibles. La separación sólido-líquido forma un lodo que, según el proceso aplicado, puede contener de 1 a 30% de sólidos en peso. Este lodo debe eliminarse de una manera ambientalmente aceptable.

La química básica de la neutralización es bastante conocida y existe abundante material académico para comprenderla. También existen otros tipos diferentes de procesos de neutralización con cal, cada uno posee sus respectivas fortalezas y debilidades. Los procesos aplicar deben ser evaluados a nivel laboratorio o piloto para luego poder idear sistemas concretos de tratamiento existentes.

Algunos contaminantes no se tratan fácilmente simplemente controlando el pH con cal y separando los precipitados. Este es el caso del arsénico y el molibdeno, por ejemplo. Estos dos contaminantes deben coprecipitarse con otros metales, generalmente sulfato férrico. Los sistemas de tratamiento para estos difieren del tratamiento típico de AMD.



Figura 15: Muestras efluente minero, AMD

Para el drenaje ácido de minas, generalmente es más rentable oxidar con aireadores. A veces se necesita un ajuste menor del pH para convertir los metales a su forma precipitada. Los permisos de descarga también pueden requerir un pH específico, generalmente alrededor de 6-8.

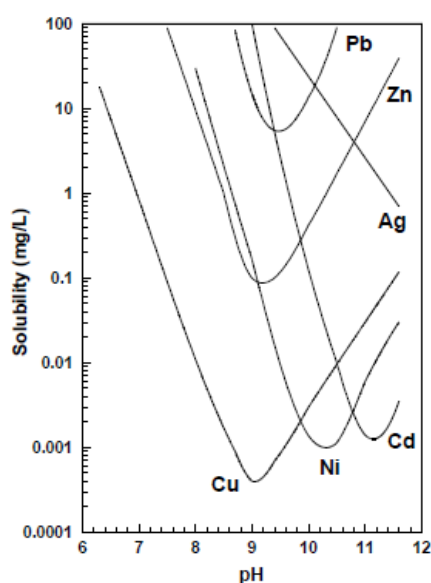


Figura 16: Solubilidad de los hidróxidos de metales en función al pH

Se debe tener especial cuidado al elevar el pH. Elevar el pH más alto de lo necesario agrega el costo del químico utilizado a la operación. Elevar demasiado el pH también podría provocar la precipitación de metales que no es necesario eliminar, como el calcio y el magnesio. Esto podría aumentar significativamente la cantidad de producto químico requerido para elevar el pH y también aumentaría la cantidad de lodo producido, posiblemente aumentando el costo operativo a largo plazo (Bernard Aubé, 2004).

La sedimentación por gravedad es el método más rentable para eliminar los sólidos precipitados. Los sólidos precipitados se sedimentan lentamente. Cuanto más lento se asientan los sólidos, más espacio necesitan para asentarse.

Las tasas de sedimentación pueden aumentarse mediante la floculación. La floculación es la adición de un polímero polielectrolito de cadena larga para aglomerar o unir los sólidos precipitados. Las partículas aglomeradas más grandes y pesadas se asientan más rápido. Las partículas tienen que interactuar para flocular. Más sólidos mejoran la floculación. Cuando no hay suficientes sólidos, no se obtienen interacciones partícula-partícula y los sólidos no forman partículas de asentamiento rápido. La cantidad de sólidos se puede incrementar mediante recirculación.

Existen varios tipos de clarificadores cuyo diseño está concebido para que sean capaces de recircular grandes cantidades de sólidos sedimentados internamente. Existen además otros tipos en los cuales la recirculación es interna como externa. Un último tipo de clarificador utiliza arena como medio para floculación lastrada que mejorara el proceso y aumenta la tasa de sedimentación.

Los clarificadores tradicionales o espesadores de alta tasa se utilizan cuando hay suficientes sólidos para la floculación sin recirculación interna de sólidos. Son fáciles de operar, requieren la menor atención del operador y, por lo general, producen una concentración de sólidos mayores en su caudal inferior.

Para cualquier de los casos, el diseño de un clarificador parte como todos los procesos de separación de sólido-líquido o tratamiento de agua de tres variables principales; el caudal a

tratar, la calidad de agua o tipo de agua a tratar y las metas respecto a los parámetros de interés por parte del usuario.

El caudal es un parámetro dependiente de los procesos que se desarrollen aguas arriba, sea que la fuente se origine en la planta de beneficio o sea drenaje ácido de mina, para el primer caso normalmente el volumen de agua necesario para operar la planta está definido y es objeto de estudio por parte de los encargados del proceso principal del proyecto minero, la recuperación de metales preciosos. Son ellos los que definen cuál es el caudal de agua necesario para poder llevar a cabo esta recuperación. Con este flujo, se calcula cuál es el caudal esperado a tratar luego de haber pasado por algún proceso de deshidratación como es el que se da regularmente por los espesadores de relave. Es el licor recuperado de este proceso de espesamiento el caudal a tratar para el clarificador.

La calidad del licor o agua recuperada de este espesador y los componentes o sustancias presentes dependerán también del proceso que se haya realizado en la planta de beneficio, el mineral explotado, el proceso de recuperación, el pH del proceso, la mineralogía de material, la granulometría y otros factores interactúan entre sí para definir las propiedades físicas y químicas del efluente a tratar.

Las metas de tratamiento están definidas por dos posibilidades, un posible reúso en algún proceso paralelo y las exigencias en calidad que este requiere o el marco legal que regule la descarga de este efluente hacia algún cuerpo receptor.

Así, definidos caudal, calidad de entrada y calidad de salida se inicia el proceso de diseño. Es necesario primero establecer cuál es el tiempo requerido por estas partículas para sedimentar, una vez definido el tratamiento químico necesario y si es necesario o no la recirculación de sólidos para fomentar el crecimiento de estas partículas y con ello disminuir el tiempo que necesitan para separarse de la fase líquida de la pulpa.

Estos ensayos en floculación se pueden realizar a nivel laboratorio, en ellos también se definirá si cualquier otro agente químico será requerido.

Hallando las tasas de sedimentación reales, se escalan al flujo real a tratar y se dimensionan el tanque teniendo en cuenta el tiempo de retención hidráulica para el proceso de clarificación.

Se puede inferir entonces, que para poder liderar este proceso o por lo menos para ser capaz de construir un discurso comercial respecto a este tipo de equipos es vital comprender y contar con una base sólida en conceptos hidráulicos. Es por ello por lo que la formación del ingeniero agrícola calza perfectamente en el contexto académico necesario para la discusión de este tipo de equipo.

Con las características hidráulicas definidas, el análisis de los equipos mecánico-eléctricos necesarios para el proceso de clarificación puede iniciar. Unidades de accionamiento de mecanismos y rastras, bombas para la recirculación interna o externa, válvulas automatizadas y otros equipos periféricos podrían formar parte de la solución propuesta. Gracias a los cursos dictados por el departamento de mecanización es posible la interacción cómoda con profesionales de otras disciplinas para ser capaz de liderar la implementación de una de estas soluciones o desarrollar el discurso comercial para poder cerrar una oportunidad de venta.



Figura 17: Cambio de cabezal bomba dosificadora durante piloto

La construcción en si del equipo además también genera una necesidad, aunque no crítica, de contar con conocimientos en el campo estructural. Los tanques dependiendo de la

aplicación normalmente se construyen en algún tipo de acero, sea al carbono o inoxidable. Además, existe la posibilidad que estos tanques sean elevados, es decir auto soportados sobre “patas” con una base cónica de concreto por lo cual el profesional involucrado en el diseño, instalación o venta de este tipo de equipos deberá conocer cómo es que factores como el tipo de suelo, las cargas, la resistencia de materiales y otros podrían afectar estructuralmente estos equipos.



Figura 18: Tanque de concreto clarificador primario

Para aquellos clarificadores más complejos en donde las necesidades del proceso o el requerimiento del cliente involucran cierto grado de automatización o ajusten de dosificación en línea, monitoreo constante, secuencia de procesos que se deben de dar de manera autónoma, una lógica de control deberá ser establecida y con ella la programación de un PLC y un HMI para la interfase con los operadores. Asimismo, contactores, variadores, llaves térmicas y otros equipos formaran parte del arreglo mecánico-eléctrico propio de esta automatización por lo que el líder responsable deberá entender y poseer cierto grado de familiarización con ellos y ser capaz de identificar posibles fallas en campo o diseño.

La Tabla 6, muestra los cursos de la malla 2001 con mayor aporte en conocimientos para enfrentar en este tipo de proyecto.

1.2.5. Sedimentación industrial en minería (Espesadores)

Los equipos de sedimentación industrial vienen en un gran número de configuraciones dependiendo de las exigencias particulares del sistema de separación sólido-líquido y las especificaciones del proceso atendido. Algunas pulpas “espesan” fácilmente cuando se les provee un estado suficientemente calmo, otras necesitan la adición de químicos como polímeros floculantes además de energía mecánica para una mezcla apropiada además de

condiciones con poca o ninguna turbulencia.

Pulpa, en la industria minera, es una mezcla de mineral finamente molido, agua y productos químicos utilizados en el procesamiento de minerales. Son mezclas de sólidos y líquidos en forma de suspensiones de tal forma que sus características y comportamiento se pueden estudiar como un fluido homogéneo.

Tabla 6: Malla Curricular 2001 y Tratamiento de efluentes mineros y metalúrgicos

Mecanización y Energía	Ordenamiento Territorial y Construcción	Recursos Hídricos
Circuitos y maquinas eléctricas	Análisis estructural I	Aguas subterráneas
Análisis de elementos de máquinas y mecanismos	Análisis estructural II	Gestión del agua
Instalaciones eléctricas y electromecánicas	Concreto reforzado	Hidráulica
órganos de maquinas	Dibujo en ingeniería	Ingeniería del agua y medio ambiente
Termodinámica	Diseño rural	Manejo y gestión de cuencas
	Evaluación y monitoreo ambiental en proyectos de ingeniería	Mecánica de fluidos
	Materiales de construcción	Manejo y gestión de cuencas
	Mecánica de suelos	
	Mecánica vectorial II	
	Resistencia de materiales	

Remover una gran cantidad de solidos de una pequeña cantidad de líquido con énfasis en la concentración de solidos obtenido, es el concepto general de espesamiento en minería, los componentes generales de este equipo se muestran en la Figura 19 (Concha, 2014).

Existen muchas configuraciones para los espesadores, tamaño, velocidad o capacidades pueden ser propias de cada modelo o proveedor, pero las funciones básicas se mantienen

iguales para todos los tipos. Normalmente los encontramos en dos etapas del proceso de minería, en las plantas de beneficio o concentrado de minerales y en la última parte de la cadena como pieza fundamental en la gestión de relaves.

Dentro de las técnicas tipo de concentración de minerales encontramos la lixiviación (lixiviación) que se usa comúnmente para recuperar una amplia variedad de metales, incluidos los metales preciosos. Un lixiviante disuelve los metales deseados del mineral; la lixiviación con cianuro, por ejemplo, se usa ampliamente para extraer oro, muy a menudo es seguida por un circuito de decantación contracorriente (CCD) para recuperar el valioso mineral de la merma o en este caso relaves. El CCD consiste en lavar la suspensión de alimentación en una serie de espesadores hasta que se elimine la mayoría de los metales disueltos.

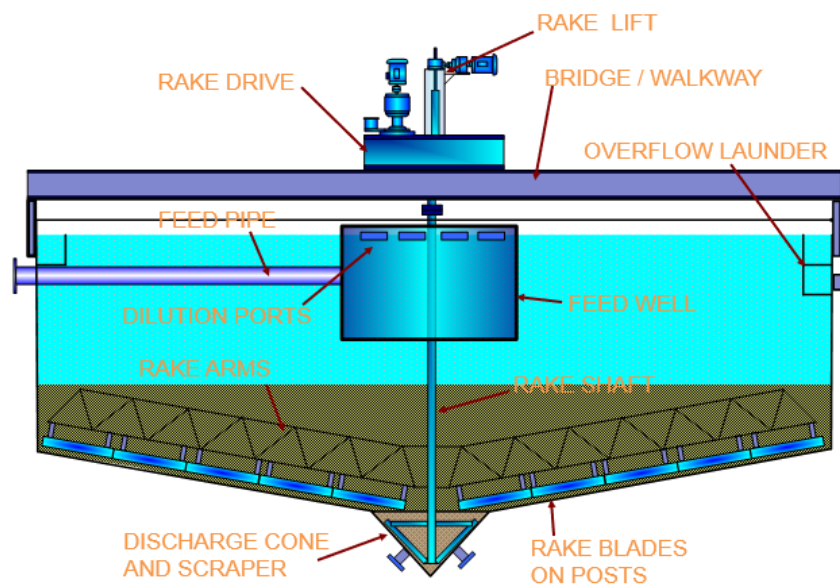


Figura 19: Componentes de un Espesador Westtech

El caudal inferior será enviado al sistema de gestión de relaves, la otra etapa donde se encuentran normalmente los espesadores en donde se deben priorizar dos puntos específicos:

- Recuperación de agua
- Maximizar el uso de la relavera

La gestión de relaves mineros y su impacto en el uso del agua es una preocupación importante para cualquier empresa minera. El desafío actual, ya sea extraer aluminio, zinc, cobre, oro, plata, hierro o cualquier otro mineral precioso, es cómo desechar el material de relave de manera que esté contenido y estable, mientras se maximiza la reutilización del agua y se minimizan sus impactos ambientales y el uso de la superficie o área disponible para su disposición con los posibles efectos en las comunidades cercanas que estos podrían tener.

El aumento de la recuperación de agua es importante para cualquier proyecto minero en todos los países en el mundo debido a la escasez de agua dulce y es un tema especialmente sensible en Perú. Cuanta más agua se pueda recuperar de un flujo de relaves y a su vez se use nuevamente aguas arriba en la planta de beneficio, se reduce la cantidad de agua dulce que necesita una mina para poder operar. El costo del agua junto con los posibles conflictos sociales que podría ocasionar el uso de agua dulce son con frecuencia los principales factores para implementar un sistema de espesamiento de relaves.

Por otro lado, cuando las relaveras alcanzan su máxima capacidad, la construcción de una nueva presa o un recrecimiento de esta suelen ser las soluciones para el problema de deposición. Ambas son soluciones muy costosas y no siempre alguna de ellas son opciones viables si existen limitaciones con los permisos ambientales, de licencias y de espacio.

Al utilizar un espesador, el flujo de relaves deshidratados se deposita en la relavera existente, lo que aumenta la vida útil del embalse. El agua libre existente en el estanque se desplazará y estará disponible para su recuperación, a mayor concentración y propiedades de secado del material dispuesto ocupará menos espacio, extendiendo la vida útil de la relavera (Figura 21).



Figura 20: Relavera UM El Porvenir Pasco

El reúso del agua en la gestión de relaves mineros es particularmente crítico en entornos áridos y semiáridos donde la disponibilidad de agua es limitada y el uso está estrechamente regulado por los organismos fiscalizadores del estado. Las altas tasas de evaporación presentes en ciertas épocas del año dependiendo de la ubicación del proyecto minero genera aun mayor estrés en el uso de fuentes de agua dulce por lo cual se hace necesario implementar un sistema que pueda recuperar la mayor parte del agua antes de llegar a la relavera y no perder un gran porcentaje por evaporación.

El escenario ideal para el diseño de un espesador es tener acceso a muestras representativas del material a procesar y con ellas llevar a cabo estudios de caracterización y pruebas en laboratorio con el fin de usar datos reales de la futura operación del equipo capital. Sin embargo, este es escenario menos común en la interacción regular con los clientes. Normalmente se tiene acceso a información muy básica y el diseñador deberá asumir comportamientos del material en base a su experiencia o la propia de la organización donde se desempeña, las cuales normalmente han desarrollado suficientes proyectos como para estimar muchos de los datos necesarios para el diseño en base a su experiencia previa. Se recurre entonces al uso de tablas para el diseño. El propósito es proveer el dimensionamiento básico del equipo cuando no existe datos disponibles o antes de tener acceso a las muestras para realizar pruebas.

Algunos proveedores consideran el dimensionamiento de sus espesadores como información propietaria pues tienen como parte de su lógica un factor de experiencia significativo.

Después de tomar una primera aproximación al diseño del equipo y si fuera necesario, se deberán ejecutar las pruebas de laboratorio o estudios piloto que confirmen las asunciones tomadas por el diseñador en base a la información extraída de las tablas de diseño.

Dentro de las pruebas ejecutadas se tiene como primer paso el ensayo de varios tipos de polímeros (Figura 22).



Figura 21: Pruebas de polímero

El uso de polímeros es muy importante para los equipos de espesamiento modernos. La estructura apropiada del floc proporciona un asentamiento rápido el cual minimiza el diámetro del espesador y además le proporciona suficiente resistencia para maximizar la deshidratación del caudal inferior de sólidos a través del uso de las rastras o mecanismo del espesador.

La selección del polímero adecuado se lleva a cabo comparando la tasa de sedimentación para varios tipos de floculantes. La evaluación también debe incluir el costo de este. Es así que se selecciona aquel que tenga el mejor ratio costo/beneficio en términos de velocidad de sedimentación y calidad del agua recuperada.

Uno de los problemas principales en la floculación, una vez que el polímero correcto ha sido determinado, es fomentar la mezcla eficiente de la pulpa de alimentación con el flujo de polímero. Debido a que para casi todos los casos el caudal de dosificación de este insumo químico es muy pequeño y debe ser mezclado con un caudal bastante grande de pulpa de alimentación, normalmente es diluido con agua clarificada o fresca equivalente a 1-2% del

caudal de entrada al equipo. Esta proporción diluida aumenta las probabilidades de un buen contacto entre el polímero y toda la pulpa de alimentación.

Casi todas las aplicaciones de espesamiento son para un flujo cuya alimentación tiene una alta concentración de sólidos. Si se realizaran pruebas de dimensionamiento con este alto contenido de sólidos, el área necesaria para sedimentarlos en el espesador podría ser excesiva debido a la baja tasa de sedimentación en comparación con la óptima concentración de sólidos.

Se deberá dimensionar un espesador a partir del establecimiento del contenido óptimo de sólidos en la alimentación, el cual aprovecha las mejores condiciones para la formación de floc. La concentración óptima de sólidos se puede determinar realizando una serie de pruebas con diferentes concentraciones, pero con la misma dosis de floculante (Figura 23).



Figura 22: Prueba de concentración de solidos optima

Definido el caudal a procesar de pulpa, así como las toneladas secas de material que alimentaran el espesador y luego de haber definido las variables propias del material procesar, como son la gravedad específica, la granulometría, pH y otras, junto con los datos recolectados en las pruebas de laboratorio o los extraídos de tablas de diseño donde se determinan la concentración de solidos a la cual se deberá diluir la alimentación al espesador con la que se consigue una mejor sedimentación para un dosificación especifica de polímero se puede tomar en cuenta además la metas respecto a la concentración de sólidos en al flujo inferior del espesador por parte del usuario y así finalmente estimar las dimensiones finales

del espesador tanto en diámetro como en altura de pared de tanque y la pendiente del piso.

Estas dimensiones son fuente de datos para el diseño estructural tanto del tanque como del mecanismo que es el conjunto de partes responsables de la deshidratación de los sólidos y de su movimiento hacia el centro del espesador para evacuarlo, conformado por eje central y las rastras. Para obtener el diseño final se debe tener en cuenta las cargas a las cuales el espesador será sometido, el método de montaje pudiendo ser estos soldados en campo o emperrados, esta elección tiene un gran impacto sobre los esfuerzos que deberá soportar cada parte a ensamblar y por tanto en las características del material a usar como puede ser el grosor de la plancha de acero que se usará. Asimismo, la zona sísmica donde se instalará el espesador es un factor importante a tener en cuenta cuando se hacen los cálculos estructurales para determinar el diseño del espesador.

Con los esfuerzos y el cálculo estructural completo se debe además incluir en el análisis el tipo de material a procesar, en la industria minera dependiendo del proceso al cual le hará frente el espesador, se pueden encontrar pulpas muy corrosivas que pueden afectar significativamente la vida útil del equipo, tanto del mecanismo como del tanque, es responsabilidad del diseñador además hacer una correcta selección del material a usar, sea acero al carbono o algún tipo de acero inoxidable 304, 316 o algún tipo de material exótico como acero inoxidable 317, otra posibilidad es proteger el acero con algún tipo de recubrimiento, cual sea la opción tomada por el diseñador deberá cumplir con los estándares del usuario final en términos de vida y útil pero además se debe hacer un análisis comercial de la solución pues es la fabricación y el material que usa uno de los componentes con más peso en costos del equipo final.

Por otro lado, diseñador y/o estimador tiene la oportunidad de seleccionar el tipo de tanque a usar, siendo estos de dos grandes grupos como son los tanques elevados auto soportados, como se muestra en la Figura 20, en donde las “piernas” del espesador descansan en dado de concreto y estos son prolongación de la cimentación, el piso y el cuerpo del espesador son fabricados en metal pudiendo ser como se mencionó soldado en campo y emperrado como el que se muestra en la Figura 24.



Figura 23: Tanque elevado

Otra posibilidad es usar un “tanque anclado”, en este tipo de tanque la pared lateral se fabrica en acero, el cono inferior que hace de piso del espesador se construye en concreto, la pared lateral metálica se ancla luego usando un anillo para fijarla al concreto y luego se vierte concreto, como el mostrado en la Figura 25.

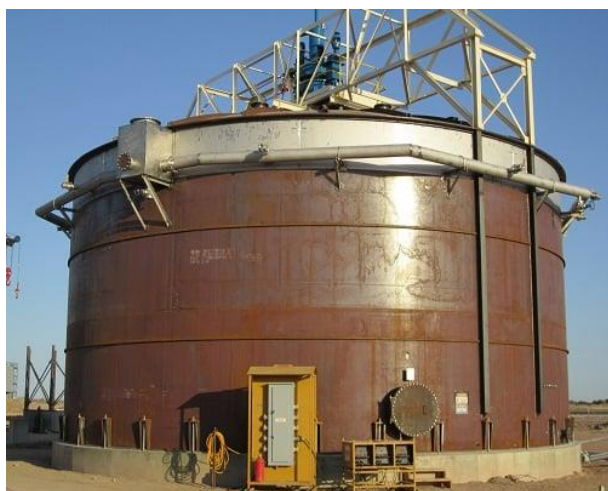


Figura 24: Tanque anclado

Con las dimensiones del espesador y conociendo las características del material a procesar es ahora posible determinar cuál será la cantidad de material a movilizar dentro del espesador y la exigencia en términos de potencia y torque para poder empujarlo desde toda el área útil del piso del espesador hacia el centro de este y poder evacuarlo. El torque es función del diámetro del espesador y de una constante “K” definida por la experiencia del diseñador o por directrices de la organización responsable de brindar la garantía de operación del equipo.

Para terminar, se especifica la unidad de accionamiento sea electromecánica (Figura 26), o hidráulica. Esta se compone de un arreglo de piñones y motores eléctricos o hidráulicos responsables de movilizar el eje y las rastras que transportan el material espesado hacia el centro para poder evacuarlo del tanque y transportarlo a través del bombeo hacia su lugar de disposición final o al siguiente proceso de deshidratación.



Figura 25: Unidad de accionamiento electromecánica Westech

Al mismo tiempo, se debe pensar que el equipo seleccionado está diseñado para cumplir las metas requeridas en la concentración de sólidos del flujo inferior y en el licor o agua recuperada por el usuario final bajo las condiciones de alimentación y características del material a procesar consideradas para su diseño y que dichas condiciones de operación de deben mantener por lo que se hace obligatorio el empleo de instrumentación que permita monitorear tanto las condiciones de entrada que tengan mayor influencia sobre el proceso así como la condición de ambos productos de salida.

Regularmente el parámetro más importante para el agua o licor recuperado de un espesador en la turbidez por lo que es fácil su monitoreo mediante un instrumento en línea, para el flujo inferior el parámetro más importante a medir en la concentración de sólidos en masa por lo que su medición es indirecta a través del uso de densímetros y flujómetros. La instrumentación permitirá al usuario final realizar una auditoria constante del cumplimiento de las metas objetivo y con ello tomar las acciones correctivas correspondientes en caso sean necesarias. También se puede usar las lecturas de instrumentación como datos de entrada para la construcción de una lógica de control automatizado que por ejemplo podría aumentar o disminuir la velocidad de la bomba que extrae los sólidos del espesador y con ello

modificar el tiempo de residencia de los sólidos en el espesador y así la concentración de sólidos en masa del flujo inferior que sale del mismo o por ejemplo modificar la velocidad de la bomba de polímero y así corregir la dosificación en función de la turbidez del agua recuperada.

Por lo expuesto se puede inferir que el profesional encargado de liderar el montaje, instalación o puesta en marcha de este tipo de equipos deberá poseer conocimientos en mecánica, cálculo estructural, hidráulica, electricidad y control para poder interactuar con todas las disciplinas involucradas y poder lograr una integración exitosa del sistema. Además, aunque no obligatoriamente, es deseable conocer conceptos en geotecnia pues dependerá de la operación exitosa de los espesadores relaves pues su impacto se verá reflejado directamente en la vida útil la presa de relaves.

La Tabla 7, muestra los cursos de la malla 2001 con mayor aporte en conocimientos para enfrentar en este tipo de proyecto

Tabla 7: Malla Curricular 2001 y Sedimentación industrial (espesadores)

Mecanización y Energía	Ordenamiento Territorial y Construcción	Recursos Hídricos
Circuitos y maquinas eléctricas	Análisis estructural I	Gestión del agua
Análisis de elementos de máquinas y mecanismos	Análisis estructural II	Hidráulica
Instalaciones eléctricas y electromecánicas	Concreto reforzado	Ingeniería del agua y medio ambiente
Instrumentación electrónica	Dibujo en ingeniería	Mecánica de fluidos
Mantenimiento de maquinaria	Evaluación y monitoreo ambiental en proyectos de ingeniería	
Motores y tractores	Geología y geotécnica	
Órganos de maquinas	Materiales de construcción	
Mecánica vectorial i	Mecánica de suelos	
Termodinámica	Mecánica vectorial II	
	Programación y supervisión de obras	
	Resistencia de materiales	
	Técnicas de la construcción	

II. INTRODUCCIÓN

El presente documento además de cumplir con ser herramienta para optar por el título de ingeniero agrícola tiene como intención poner en valor las ventajas de la formación ofrecida por la facultad, en el área de saneamiento y las técnicas de separación solido-liquido. Gracias al contenido de los cursos dictados en sus tres departamentos académicos, el profesional egresado puede interactuar con profesionales de todas las disciplinas involucradas en estos tipos de proyectos, de manera cómoda y además de permitirle liderar todas las fases del mismo como el integrador de la solución final y/o desenvolverse exitosamente como parte de la fuerza comercial de la organización representada.

Se presentarán tres casos de la vida profesional del postulante describiendo el uso de los conocimientos adquiridos a lo largo de la formación universitaria.

Los casos son: Ampliación PTAP El Milagro Cajamarca, construcción, montaje y operación PTARI Minka DAF y Campaña de pilotaje de espesador de pasta para relaves UM El Porvenir Nexa, se hará uso de material documentario y fotográfico recolectado por el postulante durante del desarrollo de los casos mencionados.

III. OBJETIVO

Describir el impacto de la formación de la carrera de-Ingeniería Agrícola, en el área de saneamiento y en las técnicas de separación solido-liquido

IV. CUERPO DEL TRABAJO

4.1. Caso 1: Ampliación PTAP El Milagro Cajamarca

La planta de tratamiento de agua potable el milagro se encuentra en el caserío de Huambocancha Baja, a unos 5.4 km. de Cajamarca y a 2844 msnm. Con una capacidad nominal de tratamiento de 140 l/s, construida en el año 1980. Las fuentes de abastecimiento de esta planta de tratamiento son el río Porcón y río Grande.

En el año 2008 se amplió la capacidad máxima de tratamiento de la planta de 140 l/s a 200 l/s. Conformando su infraestructura actual por un cámara de reunión de agua cruda y medición de caudal en un medidor tipo Parshall, una cámara de mezcla rápida donde se dosifica la cal para la regulación de pH, un tanque de concreto llamado presedimentador por los operadores, Figura 27, el cual hace la función de clarificador y es la primera estructura que brinda tiempo de residencia hidráulica suficiente para que los sólidos de mayor gravedad específica, como grava y arena sedimenten hacia el fondo del mismo. En eventos de lluvia donde se podrían registrar picos de turbiedad debido a los deslizamientos en la parte superior de las cuencas de ambos ríos se dosifica polímero aniónico, fomentando la aglomeración de las partículas y su sedimentación a tasas mucho más altas. A continuación del sedimentador se ha construido una estructura hidráulica que fomenta un flujo muy turbulento, se aprecia un resalto hidráulico inmediatamente después de la dosificación de sulfato de aluminio, esta estructura hace de mezclador rápido, mostrado en la Figura 28.



Figura 26: Presedimentador

Luego de la dosificación de sulfato de aluminio el agua ingresa a dos estructuras rectangulares de concreto armado, contiguas a la cámara de mezcla rápida, llamados floculadores en donde eventualmente se dosifica un polímero catiónico en base a tablas de turbiedad elaboradas por el personal supervisor, luego de estas cámaras el flujo pasa a los sedimentadores, compuesto por dos tanques rectangulares de concreto armado contiguos a los floculadores, finalmente se tienen los filtros conformados por cuatro tanques rectangulares que cuentan con un falso fondo, en el cual se ubican el lecho filtrante mixto de antracita y arena con soporte de grava. Estos filtros se encuentran conectados a un sistema de retrolavado el cual se efectúa con bombas centrífugas instaladas en paralelo las cuales toman agua limpia de una cisterna de agua filtrada y un reservorio ubicado en la parte superior de la planta. Por último, se efectúa la desinfección del agua mediante la adición de cloro gas a la salida de los filtros en una línea que alimenta a un tanque cisterna de almacenamiento final.



Figura 27: Cámara Mezcla rápida

En el año 2017 un convenio entre la Municipalidad Provincial de Cajamarca, Sedacaj y la Asociación Los Andes Cajamarca, ALAC, (una organización subsidiaria de Yanacocha para la planificación y ejecución con foco en las relaciones comunitarias), permitió se desarrolle el proyecto de ampliación de la planta, el que involucraba mejoramientos de las obras hidráulicas, como los canales de alimentación, sedimentadores y cisternas, además concebía la adquisición, instalación y puesta en marcha de plantas compactas y modulares que proporcionen por lo menos 120 l/s adicionales de capacidad de tratamiento. Así, se designó una empresa especialista en obras civiles local, a quienes se les encargaron los estudios previos para la elaboración del expediente técnico y su ejecución. La supervisión estaría a cargo de personal de ALAC.

La constructora local debía presentar los proveedores de las partidas principales, como la de equipamiento de la nueva planta, a la supervisión y se tomaría en conjunto una decisión en base a las experiencias de ambos.

ALAC, subsidiaria de Yanacocha decidió por un proveedor conocido. Westech Inc., empresa que tiene instalados equipos para el tratamiento de aguas acidas de mina (AMD) en Yanacocha desde año 1993, por lo que la marca era bastante conocida para los financistas del proyecto.

El equipo del proveedor debía trabajar en conjunto con su representante comercial, encargados del montaje y la constructora local encargada de todos los trabajos civiles. Cabe mencionar que esta es la primera planta de su tipo instalada en Perú por lo que la guía y la coordinación con el equipo del proveedor era crítica para cumplir las metas de plazos e instalación satisfactoria de la nueva planta.

El equipo de Westech Inc. estaba conformado por mi persona, como Project manager y el grupo de procesos de la oficina central ubicados en Ames, Iowa, EE.UU., el soporte sería en su mayoría remoto a excepción de tres visitas de personal técnico de campo especialista en la puesta en marcha del producto en específico. Estas visitas tuvieron una duración de entre 10 a 21 días dentro de los cuales el personal técnico debía supervisar el correcto montaje de los equipos y brindar sus recomendaciones sobre las desviaciones que se pudieran presentar

durante el proyecto.

El equipo seleccionado fue una planta compacta y modular capaz de contener los procesos de coagulación, floculación, sedimentación y filtración en un solo tanque; llamado Trident HS (Figura 29). El equipo consta de dos módulos independientes, cada uno de ellos es tren completo del proceso, el cual está constituido por la dosificación de coagulante al inicio del proceso y en línea, el coagulante pasa por un mixer estático que genera mucha turbulencia y fomenta el contacto del sulfato de aluminio con todas las partículas presentes en la alimentación, esta dosificación se hace en una línea de alimentación compartida para ambos módulos, luego el flujo se divide por la mitad en líneas independientes para cada uno, en esta línea y previo al ingreso al tanque se dosifica polímero aniónico con el fin de fomentar la aglomeración de las partículas coaguladas anteriormente. Ya dentro del tanque el agua luego de la adición de químicos ingresa a la primera sección del proceso, compuesto por un primer clarificador, el agua ingresa por un tubo en forma de U con agujeros que apuntan hacia el piso ubicado en la zona media baja del tanque de acero, por sobre este tubo se instalaron unos módulos de PVC en forma de panal de abeja llamados sedimentadores tubulares, estos le quitan velocidad a las partículas que se mueve hacia la superficie con velocidad ascendente por lo que en la parte superior de este primer clarificador ya se puede notar agua de mejor calidad, clarificada, y lista para pasar a la siguiente etapa.

En la segunda sección del tanque se ubica el denominado clarificador de absorción, compuesto por media filtrante flotante, pellets de HDPE con mucha área superficial, esta media retiene los sólidos que no pudieron sedimentar en la primera etapa del tratamiento. El agua es colectada en la parte superior del clarificador de tubos, por líneas de PVC a lo largo y ancho de la superficie del clarificador, estas líneas se juntan en un tubo colector principal que cumple la función de alimentar a una bomba de transferencia la cual impulsa el agua desde la superficie del clarificador de tubos por debajo del clarificador de absorción y a través de la media filtrante flotante para emerger por la parte superior, la media flotante es retenida por una malla fina en la parte superior la cual solo permite el paso del agua que debería estar en el rango de 2 a 15 NTU, luego por rebose el agua pasa al filtro de media mixta, el cual está compuesto por antracita, arena silica y garnet (arena), el flujo ingresa por la parte superior y sale de la unidad por la parte inferior donde se instaló un sistema de falso fondo el cual permite el paso del agua filtrada y retiene la media. El equipo cuenta con

instrumentación como caudalímetros, sensores de nivel, sensores de proximidad, turbidímetros y manómetros, los cuales permiten automatizar todos los subprocesos, los turbidímetros y manómetros por ejemplo disparan el inicio de la secuencia de retrolavado para el filtro, un manómetro adicional dispara la secuencia de lavado en el clarificador adsorción, los flujómetros a la entrada regulan la dosificación de químicos y los sensores de nivel trabajan en conjunto con variadores instalados en el panel de control para aumentar o reducir la velocidad de la bomba de transferencia en base al caudal disponible para el tratamiento. Válvulas neumáticas automáticas controlan la dirección y el flujo. Toda la lógica de control es cargada a un programa y comandada por un PLC cuya interfaz es una pantalla táctil (HMI) la cual permite seleccionar más de un tipo de operación y modificar parámetros como dosificación de químicos, límites operativos y otros.

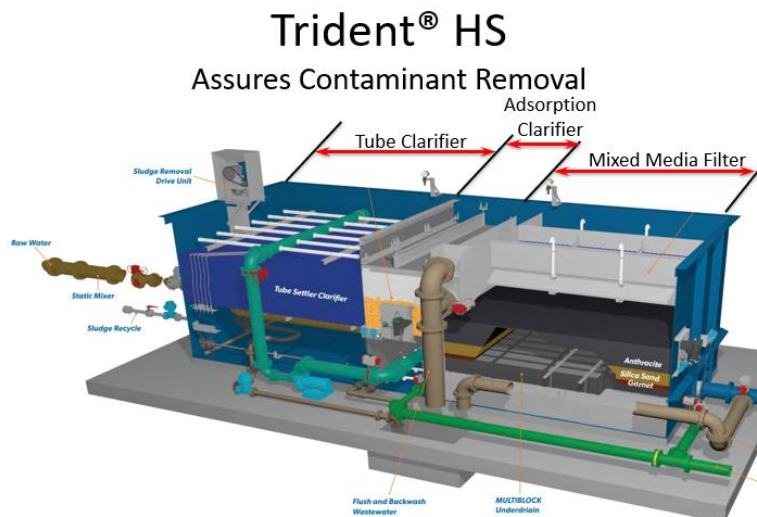


Figura 28: Trident HS Westech Inc.

Uno de los primeros problemas que se presentó previo al inicio de las actividades de montaje e instalación fue la correcta construcción de la losa que serviría de base para la instalación de los tanques y equipos, las dimensiones de la losa, la ubicación de los ductos de desagüe para el agua de retrolavado y lavado, así como la cota en la cual se ubicarían los tanques eran requerimientos sin margen de error.

Si bien es cierto el personal a cargo de la obra civil tenía claro la distribución de los equipos, su desconocimiento en la operación del equipo los llevó a paralizar los avances debido a la incertidumbre de la posición correcta de ductos y equipos. El equipo del representante

comercial estaba conformado por un ingeniero eléctrico y un ambiental, quienes colaboraron en el replanteo, sin embargo, su postura era más relajada respecto a correcciones en la obra civil. La capacidad del ingeniero agrícola para interpretar los impactos que un error en la obra civil puede significar en términos de costos y tiempo aseguran que los responsables de esta tengan un soporte verídico a consultar. Además del aparente desfase de los dados y ductos, la cota de la losa era fundamental para asegurar que se contaba con suficiente presión para la operación regular del equipo. A pesar de haber pedido una cota específica respecto a el tanque de alimentación anterior a la planta, en este caso el presedimentador, ninguno de los profesionales involucrados conocía la criticidad de este parámetro, es por ello que se procedió a verificar, trabajando en conjunto con la cuadrilla de topógrafos disponibles en campo.



Figura 29: Ambiental y eléctrico en mediciones de campo

Superados los atrasos en la obra civil, se procedió con el montaje de los equipos en campo, debido a la nueva posición de los tanques las líneas de alimentación, lavado, retrolavado, dosificación de químicos y agua tratada tuvieron que modificarse, siendo la modificación de la posición de la planta pequeña respecto al plano original aparentemente el replanteo de las tuberías no implicaba mayor problema, sin embargo para el caso de las líneas de retrolavado implicaba la instalación de accesorio adicionales, codos de noventa grados, lo cuales generaban una mayor pérdida de carga no tomada en cuenta para los cálculos iniciales (Figura 31).



Figura 30: Línea de retrolavado Trident HS

El filtro del Trident HS, usa aire y agua para su lavado, el aire es proporcionado por dos sopladores dimensionados para operar a la altura sobre el nivel del mar de la instalación y ofrecer el caudal y presión necesarios para el retrolavado. El agua, se tenía previsto sea alimentada por gravedad al contar con una diferencia de cotas importante desde el reservorio donde se almacenaba, sin embargo, con la modificación y el uso de nuevos accesorios ya no se contaba con la presión especificada por el fabricante para realizar el retrolavado, esto fue observado y se pidió a personal en gabinete que realice los cálculos necesarios y se comprobó que era necesario el uso de bombas para el proceso de retrolavado. Sin contar con nociones en hidráulica que le permitan advertir estos cambios, el personal de campo no se encontraba en capacidad de tomar una decisión sobre la modificatoria en los equipos necesarios para el proceso de retrolavado.

Culminada la instalación de todas las líneas de proceso al equipo, correspondía la instalación de los componentes internos del equipo, dentro de los cuales se encontraba el sistema de drenaje de los filtros que permite el paso del agua filtrada y la retención de la media filtrante al interior del tanque, estos falsos fondos están fabricados en HDPE, con una lámina en acero inoxidable perforada responsable de la retención de la media (Figura 32). Para la instalación de estos bloques de HDPE dentro del tanque de acero se construyó una losa a manera de base nivelada para el falso piso, luego se instalan los bloques dentro del tanque y se fijan vaciando mortero entre ellos en espacio de aproximadamente 3-4 cm de ancho y 40 cm de alto, el concreto debía ser vertido de tal manera que no se coloque material por sobre la lámina de acero inoxidable y se asegure el vertido uniforme de la mezcla sin formación de

burbujas entre bloques. El fabricante además especifica 160 kgf/cm^2 como el mínimo de resistencia a la compresión a los 30 días de curado. Al mismo tiempo, los plazos para la instalación y puesta en marcha de los equipos ya estaban desfasados. Es evidente que el profesional líder necesita conocimientos en materiales de construcción para interpretar y ejecutar exitosamente las indicaciones del fabricante, además se propuso el uso de un aditivo acelerante para poder tener una mayor oportunidad de alcanzar los plazos establecidos. La base académica del ingeniero agrícola le permite proponer soluciones también en los procesos constructivos y de instalación que requieran comprensión de materiales de la construcción.



Figura 31: Instalación falso fondo

Es en el clarificador de tubos donde se produce la sedimentación de las partículas más grandes, cuando se han almacenado suficiente cantidad de sólidos en esta primera etapa, se activa el mecanismo de evacuación que consta de un tubo de tres pulgadas con agujeros en la parte inferior que se desplaza por todo el piso del clarificador, soportado por rieles en sus extremos e impulsado por un motor electromecánico en la parte superior y conectado por cables y poleas. Este tubo está conectado a una manguera en la parte central por donde los sólidos finalmente son transportados hacia fuera del tanque pasando por un niple en la pared de este. Durante la puesta en marcha se detectó problemas en el desplazamiento de esta “barredora” de sólidos, al momento de la inspección se encontró gran cantidad de grava y arena acumulada en pocos días de operación. Se decidió hacer una inspección de las obras hidráulicas en la bocatoma de ambos ríos que alimentaban la planta, se verificó las malas condiciones de esta infraestructura y se recomendó utilizar el agua de rebose del

presedimentador como alimentación para planta modular con el fin de preservar la integridad de los equipos en particular del sistema barredor de lodos (Figura 33).

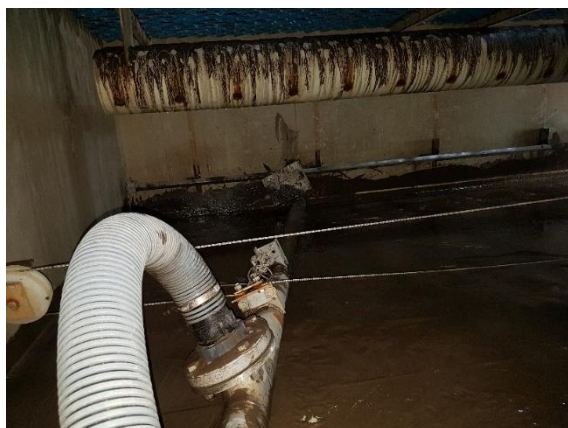


Figura 32: Barredor de lodos fuera de posición

Resueltos los problemas mecánicos se emprendió la optimización del proceso, no se contaba con un análisis de calidad de agua actualizado por lo que la dosificación de químicos tuvo que ser calculada en campo en base a una prueba de jarras y los datos recogidos de los operadores de la planta antigua. Se verificó que el cálculo de la dosificación se estaba haciendo en base al volumen de la solución suministrada al agua cruda, sin tomar en cuenta la concentración de esta. Se discutió sobre el tema con los operadores y responsables de la supervisión y se obtuvo la relación en masa de los químicos a usar, con ello se inició la optimización del uso de los mismos en la planta. El cálculo de dosificación de químicos implica la construcción de un balance hídrico y de masa entre el flujo total de agua a tratar y la estimación de sólidos contenidos en él como función de la turbidez y la cantidad en kilogramos de químicos que deberán inyectarse, este cálculo tiene un gran protagonismo en los costos operativos de planta.

Solo un profesional con conocimientos en obras civiles, hidráulica, mecánica y electricidad puede no solo supervisar y evaluar el progreso de este de proyectos, sino además ofrecer soluciones concretas a cualquier desviación respecto a la especificación del proyecto en cualquiera de las disciplinas mencionadas. La formación del ingeniero agrícola permite liderar con éxito equipos multidisciplinarios aportando a la resolución de problemas de diseño y en campo.

La capacidad del ingeniero agrícola para desenvolverse en más de una especialidad reduce la cantidad de profesionales necesarios para desarrollar este tipo de proyectos lo que reduce significativamente el gasto en mano de obra profesional, además una visión holística de la situación se puede prevenir por ejemplo como es que un desarenador en mal estado podría afectar mecánicamente algún elemento de los equipos instalados, así lo hidráulico soporta a lo mecánico.

4.2. Caso 2: PTARI Minka DAF

En marzo del 2017 el centro comercial Minka estaba a la mitad de un proceso de expansión y remodelación, las obras civiles comprendían el crecimiento del área comercial incluyendo la zona de venta de comestibles frescos como frutas, vegetales, carne, pollo y pescado. También contemplaba la remodelación del área de recepción de mercadería y la ampliación restaurantes y estacionamientos.

El proyecto en su totalidad era en magnitud y dinero invertido de considerables dimensiones, la supervisión estaba a cargo de COSAPI y la ejecución se había repartido en por lo menos tres empresas constructoras, INARCO, INGECO y Rio Bravo, cada una de ellas se había adjudicado zonas y partidas específicas del proyecto total. Dentro de la proyección de la ingeniería sanitaria se consideró la separación de las redes de desagües domésticos e industriales de acuerdo con la ubicación dentro del Centro Comercial, motivo por el cual se proyectaron la instalación de tres sistemas de tratamiento de aguas residuales industriales para poder cumplir los VMA (Valores Máximos Admisibles) que exige Sedapal para las descargas a las redes de alcantarillado, el primer sistema atendería los efluentes producidos por la comercialización del área que funcionaba como terminal pesquero dentro de Minka, el segundo atendería los efluentes producidos en la comercialización de carne bovino, ovino y porcino, la última planta recibiría el efluente generado por la comercialización de carne de pollo y restaurantes ubicados en una nueva área habilitada especialmente para ellos.

Las primeras plantas en construirse serían las adjudicadas a la constructora INARCO, quien a su vez contrataría la Gestión de Servicio Ambientales S.A.C. con nombre comercial DISAL, para el montaje, instalación, puesta en marcha y posteriormente operación de ambas plantas. La tercera planta se la adjudicó INGECO quien también tercerizó el equipamiento a DISAL. Tuve la oportunidad de ser el líder responsable del montaje, instalación y puesta

en marcha de las dos primeras plantas, proyectos que se ejecutaron casi en simultaneo con un desfase de aproximadamente 45 días, el plazo de entrega de equipos era de 4 meses pues serian fabricado en España y luego importados, la instalación y puesta en marcha tenía un plazo ofrecido de 1 mes, sin embargo, las obras civiles ya tenían un atraso acumulado desde las primeras fases del proyecto.

El área útil dentro de cualquier centro comercial es de alto valor, cualquier espacio disponible tiene como primera prioridad de uso la instalación de cualquier tipo de negocio o sus procesos de apoyo, es por ello por lo que se proyectó la construcción de todas las plantas por debajo del nivel del suelo, las tres plantas serian subterráneas. Ubicadas en el área de estacionamiento de proveedores mayoristas lo más alejadas posible de las zonas de atención al público.



Figura 33: PTARI Subterránea Minka 1

Debido a los retrasos en la obra civil y la necesidad del cliente final de usar las áreas de descarga para los camiones de mayoristas los trabajos de montaje e instalación solo se podían realizar desde las 22:00 horas hasta las 04:30 horas del día siguiente, hora en la que todos los comercios estaban ya cerrados, no había atención al público y antes de las 5:00 horas, horario regular para el inicio del ingreso de los camiones mayoristas de la playa de descarga donde se ubicaba la primera planta. Este horario de trabajo origino retrasos en los trabajos de montaje, el desempeño del personal no es regular, la falta de iluminación y las dificultades

para los desplazamientos sumaron un retraso de aproximadamente un mes más para la entrega del proyecto.

Los equipos fueron especificados por DISAL. Para ambas plantas se esperaba una calidad de agua a tratar bastante parecida por lo que los procesos propuestos eran los mismos, era solo el caudal a tratar la única diferencia. La propuesta comprendía el tratamiento de agua mediante un proceso fisicoquímico, el mismo que estaba orientado a remover los sólidos suspendidos (TSS) y aceites y grasas (A&G) muy abundantes en este tipo de efluente industrial (comercialización de pescado y carnes). Como consecuencia de la remoción de este material biodegradable, se esperaba una reducción de DBO de alrededor de 50-60% como consecuencia directa del tratamiento aplicado. Este tratamiento se esperaba debía ser suficiente para obtener los valores de la norma solicitada (DS 021-2009-VIVIENDA).



Figura 34: Descarga de DAF a PTARI subterránea

La capacidad de la planta de tratamiento propuesta fue calculada por los proyectistas y confirmada por la supervisión, fijada en 5 m³/h para la primera planta, pescado, y 10 m³/h para la segunda, carnes.

El Proceso mencionados líneas arriba, necesitaba sistemas complementarios para asegurar el cumplimiento de las metas exigidas por el cliente es por ello que también se incluyó las siguientes etapas:

- **Pre –Tratamiento**

Constituido por un ecualizador y un sistema de retención de sólidos mayores a 1mm. En este ecualizador se instaló difusores de aire con un soplador (cumpliendo las funciones mezcla y aireación) para homogenizar la calidad de agua a tratar, evitando o reduciendo el impacto asociado a picos de caudal y calidad. El ecualizador posee además dos bombas sumergibles que enviarán el agua hacia el Sistema Fisicoquímico.

- **Sistema de Tratamiento Fisicoquímico**

Constituido por un sistema DAF (Flotación por aire disuelto) con una capacidad de 5 m³/h. Este sistema cuenta con bombas dosificadoras de químicos (soda/acido, coagulante y floculante) que acondicionan el agua para permitir que los sólidos suspendidos (TSS y A&G) se separen del agua. Una vez las partículas han sido desestabilizadas (con la aplicación de los químicos) se envían hacia la parte superior del equipo DAF usando aire presurizado que se inyecta desde la parte inferior. De esta manera se consigue separar por flotación mediante aire disuelto en agua los sólidos coloidales que no sedimentan por su propio peso. En la parte superior de la celda de flotación se cuenta con un barredor de lodos accionado por cadenas y un motorreductor que arrastra el lodo separándolo del equipo, obteniendo agua libre de sólidos suspendidos (TSS), grasas (A&G) y reduciendo la DBO y DQO. De esta manera el agua queda apta para ser descargada al alcantarillado cumpliendo la normativa solicitada.

- **Sistemas Periféricos**

Constituido por los sopladores, bombas, dosificador, tableros de control, filtro prensa de lodos y otros necesarios para el correcto funcionamiento del sistema (Figura 36).

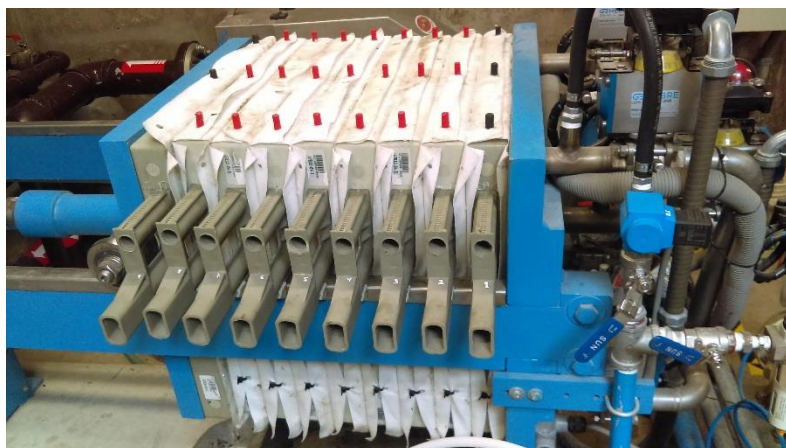


Figura 35: Filtro prensa automatizado

El primer desafío que se presentó para este proyecto fue el aprovechamiento del área reducida que el cliente nos había habilitado, se tenía un límite en el área a requerir por el presupuesto asignado a la obra civil de la PTARI, otra condición a tener en cuenta eran las líneas de energía que limitaban también la forma que podrían tomar las obras civiles. Parte de la problemática implicaba la comunicación entre los dos niveles de la planta, el nivel inferior albergaba todos los tanque necesarios para mover el fluido a través de los equipos, la cámara de bombeo, el ecualizador y el tanque de agua tratada, estos debían comunicarse con el segundo nivel donde se encontraban los equipos usando niples y tubería embebida, que debían colocarse previo al encofrado pues atravesaban la losa que hacía de techo del primer nivel y de piso del segundo nivel, la ubicación de estos niples era crítica y no permitía margen de error pues la ubicación final de todos los equipos era definida por estos tubos que permitan el paso del agua entre tanque a través de los equipos. Se elaboró un plano de todo el piping y se definió la distribución de los equipos y la ubicación de los niples, sin embargo, desviaciones podría esperarse. La instalación de los niples en la malla de la losa previa al encofrado se hizo con apoyo de personal técnico de INARCO con mi supervisión directa por la criticidad de la ubicación de los mismos.



Figura 36: Instalación tubería embebida en malla de losa

Comprender el proceso constructivo fue fundamental para planificar oportunamente la instalación de los niples y tuberías, generar los planos necesarios para la ejecución y la comunicación clara con el personal de campo.

Definida la posición de los equipos, el montaje es la siguiente etapa que ejecutar, los trabajos mecánicos incluyeron el anclaje de equipos usando pernos tipo Hilti, las tuberías se fabricaron en tubo de acero galvanizado por lo que fue necesario el corte en campo y operar una terraja eléctrica en el lugar de la instalación para fabricar las roscas necesarias para unirlos con los niples instalados anteriormente. Mientras se realizan los trabajos mecánicos, otro desafío al que se debió hacer frente fue la integración de la totalidad de equipos. El proceso iniciaba en la cámara de bombeo donde 2 bombas sumergidas alternaban y eran puestas en marcha por un control de nivel alto y protegidas por un control de nivel tipo boya bajo para evitar que funcionen en vacío, estas bombas alimentaban un tamiz rotativo el cual también tenía incorporado un sensor de nivel el cual iniciaba el equipo cuando detectaba suficiente tirante hidráulico para representar el caudal mínimo para encender el equipo, el tamiz poseía tres salidas, los sólidos retenidos que eran recibidos en una bandeja, un rebose que retornaba a la cámara de bombeo y el agua filtrada la cual pasaba al ecualizado, ahí se tenían instalados los difusores de aire alimentados por un soplador que iniciaba según un temporizador, también se habían instalado dos bombas sumergibles alternante alimentadoras del DAF, el cual también usaba un sensor de nivel para iniciar la dosificación de químicos y el arranque en general del equipo, el lodo de la superficie del DAF alimentaba un cámara de lodos, esta cámara tenía instalado un sensor de nivel de radar, señal de entrada para el inicio del ciclo de filtro prensa, por el otro extremo se habían instalado dos bombas sumergibles

en la cámara de agua tratada alternante para enviar el efluente tratado a la red de alcantarillado, paralelamente se había instalado también un preparador automático de polímero, todo este proceso debía ser integrado a través de una filosofía de control, para luego traducirla a lenguaje de programación e insertarla al PCL. La integración de todo el sistema solo se puede lograr si se comprenden los fundamentos de control, conceptos de electricidad e instrumentación y su relación con conceptos hidráulicos como tirante hidráulico, tiempo de residencia, pérdidas de carga, etc.

Es en esta variedad de conocimiento que el ingeniero agrícola destaca y le permite resolver fácil y rápidamente la integración de un sistema basado en variables hidráulicas.

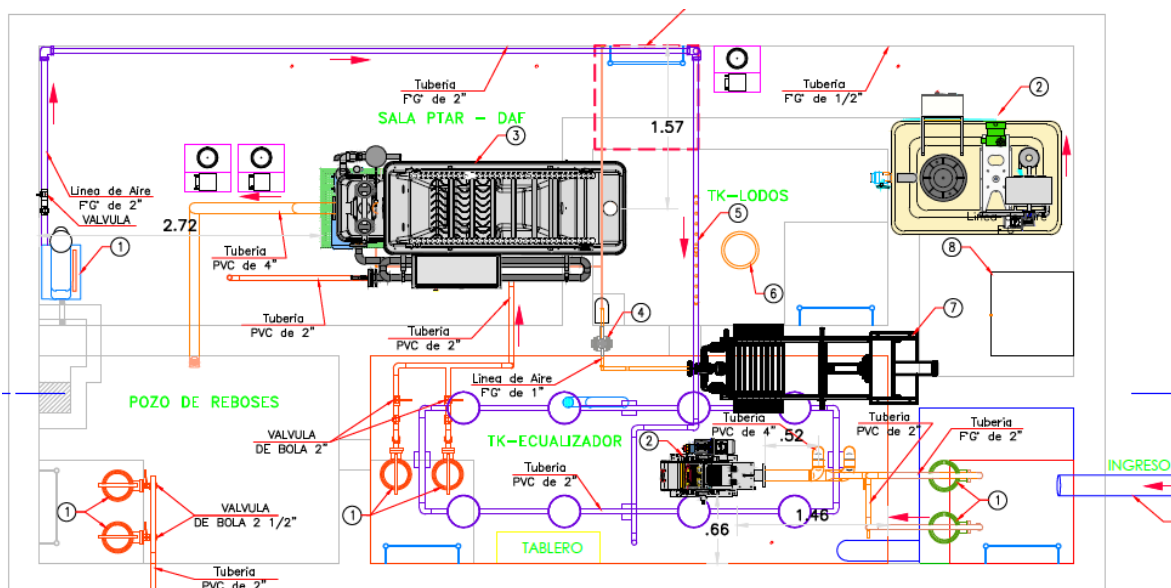


Figura 37: PTARI Minka 1

Muchas organizaciones dividen sus departamentos en construcción, procesos, sistemas, estimadores, técnicos de campo, entre otros, la reunión del conocimiento técnicas de la construcción, hidráulica y mecanización y energía de un ingeniero agrícola le permite prosperar en cualquiera de estos departamentos.

La organización representada no solo se beneficia en la menor cantidad de especialistas contratados, sino que además se reducen las posibilidades de error por coordinación en un grupo de profesionales de diferentes disciplinas.

4.3. Caso 3: Piloto Espesador de pasta para relaves UM El Porvenir Nexa

Antes de iniciar cualquier tipo de prueba, sean a escala o a nivel piloto, es esencial que todos los factores que afecta el dimensionamiento de un espesador sean identificados y cuantificados.

Hay que tener en cuenta que cualquier tipo de equipo basado en separación solido-liquido por sedimentación implica dos o más de los siguientes procesos:

- Tasa de separación: Tasa a la cual los sólidos con velocidad descendente positiva sedimentan y separan del flujo de alimentación. También se le conoce como tasa hidráulica o tasa de sedimentación.
- Capacidad de procesamiento de solidos: Cuando una cantidad considerable de solidos está involucrada en el proceso, el área de la unidad o equipo deberá ser suficiente para permitir que los sólidos se espesen a la concentración requerida.
- Tiempo de clarificación: Tiempo necesario para que las partículas finas o flocs, que normalmente se encuentran en suspensión, interactúen entre sí, se aglomeren y finalmente sedimenten y separen del efluente clarificado.
- Adición de químicos para la floculación.

El dimensionamiento de cualquier espesador debe evaluar tanto la carga hidráulica (flujo volumétrico) como la carga de sólidos (toneladas por hora -tph secas) que se procesará en el espesador. Aunque cada espesador debe considerar estos dos criterios, el proceso de separación solido-liquido se ve afectado por muchas variables como son:

- Concentración de sólidos de la alimentación o flujo a procesar
- Granulometría
- Mineralogía del yacimiento
- Química del agua

- Tipo de floculante y dosis
- Temperatura
- Gravedad específica de los sólidos a procesar

Definidas las características inherentes al sistema, sobre las cuales no existe control, se ponen en valor las pretensiones del usuario final del equipo tanto en concentración de sólidos para el caudal inferior como en calidad del agua recuperada, de acuerdo con estas y el estudio del material a procesar finalmente se hace posible el dimensionamiento y la selección de la clase de espesador.

WesTech Engineering, Inc. fue contratada por NEXA Resources para participar en un estudio a nivel piloto de un espesador de pasta con el fin de investigar el potencial del uso de esta tecnología de espesamiento como una solución a los desafíos de gestión de relaves de su planta El Porvenir. La unidad minera El Porvenir está ubicada en el Distrito de Yarusyacán, Provincia de Pasco y procesa mineral que contiene Zn, Cu y Pb con una producción declarada de 6.500 toneladas por día. Los relaves de la unidad minera Atacocha eventualmente también son recibidos por El Porvenir y descargados a la relavera El Porvenir. La planta ha estado en operación desde 1959 y actualmente se acerca al final de la vida útil de su relavera. NEXA Resources buscaba soluciones a los problemas de gestión de sus relaves junto con otros desafíos en la gestión de recursos hídricos. Los objetivos de este proyecto fueron proporcionar a la planta El Porvenir una solución de manejo de relaves que cumpla con los siguientes criterios:

- Maximizar la vida útil de la presa de relaves minimizando el volumen enviado a la misma
- Reducir el riesgo de derrames
- Incrementar la seguridad de los relaves depositados aumentando su estabilidad
- Evitar problemas de escasez de agua de proceso recuperando mayores volúmenes de agua en el espesador de relaves
- Controlar la calidad del agua recuperada del espesador de relaves
- Gestionar y planificar una futura expansión de producción en la concentradora El Porvenir de hasta 9.5ktpd (kilo toneladas por día).

Se estudiaron cuatro condiciones de alimentación durante el pilotaje en El Porvenir. Estas condiciones finales fueron determinadas durante las discusiones en la unidad minera y especificadas por el personal de NEXA que supervisaba este proyecto. Las cuatro condiciones de alimentación se identificaron de la siguiente manera:

- Relaves El Porvenir + Atacocha total
- Relaves de Atacocha
- Relaves totales El Porvenir
- Rebose del ciclón El Porvenir

El alcance del trabajo implicaba recibir, espesar y descargar muestras del flujo inferior del espesador piloto para cada condición de alimentación que se estudió según lo definido por NEXA Resources y según las instrucciones de una empresa consultora contratada para la supervisión del proyecto.

Se realizaron también estudios de bombeo y deposición del material espesado, por esta misma consultora. WesTech Engineering, Inc. recopiló los datos operativos requeridos según se había definido en las instrucciones del pilotaje por Nexa. Los datos recopilados durante cada escenario de prueba se presentaron en un anexo, como parte del informe final de las pruebas piloto.

Los métodos y el protocolo de prueba de WesTech contemplaba el uso los mismos equipos para todos los escenarios de prueba realizados por Nexa Resources en la unidad minera El Porvenir, consistieron de los siguientes equipos:

Un espesador piloto de 1m de diámetro, 8m de altura (Figura 39), tanque agitador de 0.76 m³ (Figura 40) de volumen.



Figura 39: Espesador piloto 1m diámetro



Figura 40: Tanque de agitación de 0.76m3

Dos tanques de preparación de floculante con agitadores y divididos de $0,22 \text{ m}^3$ cada uno, dos bombas dosificadoras de floculante (Figura 39), una bomba de alimentación, una bomba de flujo inferior y una bomba centrífuga para cizallamiento del material obtenido (Figura 40).

El tanque de alimentación de la planta piloto fue llenado por gravedad desde un tanque de habilitado por Nexa ubicado en una rampa superior al área de pilotaje. Luego, la pulpa de alimentación se bombeó desde el tanque de alimentación utilizando una bomba peristáltica de la serie SPX a la caja de alimentación del espesador piloto de pasta. La dilución de la pulpa de alimentación se hizo en línea usando un rotámetro para regular el agua de proceso suministrada por la planta de beneficio antes de que el alimento ingrese a la caja de alimentación del espesador piloto de pasta ubicada en la parte superior del tanque.



Figura 39: Tanque de floculante



Figura 38: Bombas de alimentación y flujo inferior

Se añadió floculante a esta caja de alimentación y se logró la mezcla adecuada del floculante y la alimentación diluida utilizando un punto de inyección de floculante ubicado en la caja de alimentación. Desde la caja de alimentación, la suspensión diluida / floculada entró en el pozo de alimentación y en el cuerpo del espesador para sedimentar y ser deshidratada hasta obtener un fluido no newtoniano, el producto final de un espesador de pasta.

Dependiendo de la duración de cada prueba de espesamiento, se recolectaron muestras de alimentación de 1 litro y se colocaron en baldes de 20 L cada media hora o cada hora para cada condición de alimento probada. Estas muestras se recolectaron como compuestos para el análisis granulométrico que permiten comprender mejor las características de la alimentación. La empresa consultora supervisora fue responsable de la recolección de estos compuestos de alimento.

Se recolectó muestras del flujo inferior del espesador cada media hora cada vez que eran descargados, se les realizaron pruebas de asentamiento similares a las que se le hace al concreto para determinar las mediciones de tensión de fluencia. También se determinó la concentración de sólidos en peso para cada muestra.

Antes de arrancar la planta piloto, se realizó una serie de pruebas en laboratorio para determinar los requisitos de dilución y dosificación de floculante. Estos hallazgos se utilizaron luego para realizar cálculos de proceso para determinar los parámetros operativos en los que se configuraría y realizaría cada una de las pruebas.

Se calibraron las bombas de floculante, alimentación y flujo inferior para los caudales calculados antes de ejecutar cada prueba.

Se determinó que el floculante se prepararía a una concentración de 0.15g/l. Esta concentración se seleccionó en función de una serie de observaciones y consideraciones que se detallan a continuación:

- La velocidad de sedimentación observada y el comportamiento del material probado.
- La formación de flóculos, el tamaño y la claridad de la muestra notados

- La energía de mezcla requerida y la facilidad de desembolso del reactivo en las muestras analizadas.
- Consideraciones de bombeo de las dos bombas dosificadoras de floculante

Se realizaron una serie de pruebas de asentamiento en muestras descargadas y recolectadas del flujo inferior del espesador. Después de recolectar estas muestras, se mezclaron suavemente para garantizar que se estudiara una suspensión homogénea. Durante la mezcla se observó que la energía física requerida para homogeneizar cada muestra se reducía rápidamente, lo que llevó a la sospecha de que este material era particularmente sensible al cizallamiento, lo que provocaría reducciones rápidas y significativas en el límite de fluencia con la implementación incluso relativamente pequeña, grados de energía de mezcla. Esta sospecha luego se confirmó cuando se tomó una muestra previa a la bomba del flujo inferior y luego de esta. Se puede observar la diferencia en la tensión de afluencia:

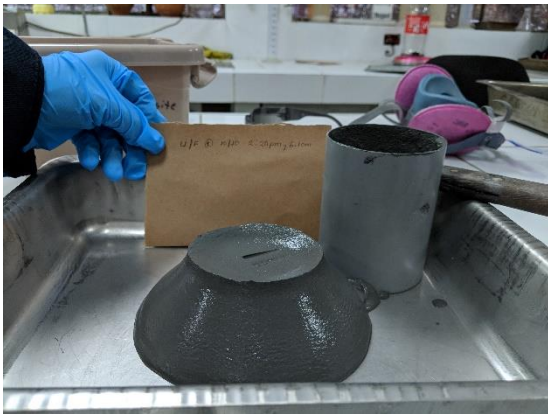


Figura 41: Material previo a bomba



Figura 40: Material luego de bomba peristáltica

Un análisis adicional por condición de alimentación de la planta confirmo que la variación en la granulometría daba como resultado fluctuaciones del porcentaje en peso de sólidos del flujo inferior.

La distribución del tamaño de partículas es un parámetro que tiene un efecto significativo en los sistemas minerales, una tesis que se confirmó durante el pilotaje.

Los resultados concluyen que cada material, cuando se procesa adecuadamente, puede

consolidarse hasta obtener una consistencia de relaves en pasta que exhibe el límite de fluencia adecuado para las metas requeridas por Nexa.

A diferencia de las pulpas que se observan regularmente como producto de un espesador, que es básicamente un líquido (fluido newtoniano) que asume la forma de cualquier recipiente en el que se mantenga, una pasta mantendrá su forma hasta cierto punto determinado principalmente por la concentración de sólidos. Se requiere presión para que la pasta fluya.

Esta presión es un término reológico llamado "tensión de fluencia", que es otra propiedad de los fluidos no newtonianos.

Cuando un fluido con una tensión de fluencia alta; como pasta de relaves minerales, es vertida en un plano inclinado la pasta puede o puede que no fluya. El flujo ocurre solo cuando la fuerza de gravedad aplicada por la inclinación del plano es suficiente para superar la tensión de fluencia. La explicación física de la presencia de la tensión de fluencia está relacionada con la granulometría de las partículas en el relave. Cuando las suspensiones de sólidos se vuelven suficientemente concentradas, las partículas finas, normalmente más pequeñas de 20 micrones, forman enlaces a través de la interacción electrostática. Esta unión da como resultado una red continua que se rompe sólo cuando se aplica una presión mínima y el movimiento es iniciado. Esta presión mínima, es la tensión de fluencia. Por lo tanto, la tensión de fluencia es la fuerza que debe aplicar a una suspensión de pasta para comenzar su movimiento.

Estas características no newtonianas proporcionan grandes ahorros a una mina. Las relaveras convencionales tienen riesgos muy importantes asociados con su operación, tales como: fallas de diques, contaminación de la capa freática, pérdida de agua, costosos embalses y la recuperación del área luego de un cierre de mina es muy difíciles debido al agua residual.

Las relaveras se construyen considerando una pendiente de diseño según la geografía del terreno y otras consideraciones de los especialistas geotécnicos. Las desviaciones a esta

pendiente tienen consecuencias negativas en la vida útil de la relavera, disminuyéndola si se encuentra por debajo del objetivo de diseño.

El ángulo que la pasta forma con el plano horizontal cuando deja de fluir, es llamado ángulo de reposo, la tensión de fluencia del flujo inferior del espesador se relaciona directamente con este ángulo de reposo y determinará la pendiente en la relavera.

Es importante entonces comprender que se debe considerar todo el sistema de gestión de relaves: espesador, bombas de impulsión, líneas de conducción y depósito de relaves para seleccionar los equipos adecuados que cumplan con los objetivos del cliente. Por la diversidad de los actores del sistema, el profesional encargado del estudio deberá poseer una base académica amplia y multidisciplinaria, pasando por lo hidráulico hasta lo geotécnico.

Los parámetros de conexión entre los diferentes actores del sistema deben incluir la reología (tensión de fluencia) de la pasta y cómo cambia con cada paso de proceso.

Este sistema se diseña en dirección opuesta al flujo del material, se debe partir de la reología requerida al final de la tubería que transporta el material a la relavera, es decir los objetivos de pendiente para la misma. La relavera de una mina es limitada y durante su vida útil debe haber un ángulo de diseño de reposo. Se capaz de comprender conceptos de geología geotecnia le brinda al profesional las herramientas necesarias para discutir cómodamente lo factores que impactan el depósito de relaves con el cliente.

La selección de las bombas y el diseño de la tubería es un proceso que requiere conocimiento de la reología y características del flujo a la concentración de sólidos seleccionada. La hidráulica y la mecánica de fluidos son los pilares académicos necesarios para comprender esta parte del sistema. Además, se debe seleccionar la ubicación del espesador de pasta, teniendo en cuenta las diferentes cotas que podrían encontrarse y las pérdidas de carga asociadas a la conducción.

Finalmente, en base a todas las decisiones anteriores, el espesador de pasta se dimensiona para producir un flujo inferior con la concentración de sólidos y tensión de fluencia necesaria

de modo que cuando se entregue al depósito de relaves tenga las características requeridas.

Las tres fases de diseño están interconectadas y una fase no se puede diseñar sin comprender los objetivos y limitaciones de las otras dos fases. El proceso es iterativo y requiere que el diseñador trabaje en estrecha colaboración con los diseñadores de bombas, tuberías y relavera, de ahí la importancia de poseer una base académica muy amplia que permita comprender los conceptos de cada una de las fases y ser capaz de proponer ideas que sumen al éxito de la solución final.

Durante el pilotaje se presentaron muchos imprevistos respecto a la operación del espesador. El área disponible para la instalación de equipo era bastante pequeña y dificultaba el tendido de las líneas del proceso, se tomó la decisión de reemplazar el material de estas líneas por HDPE (Figura 43), en vez de tubería de acero, con el fin de ahorrar el espacio de los soportes que las líneas de acero requieren.



Figura 42: Líneas de HDPE

Al inicio de la puesta marcha se notó que la unidad dejaba de funcionar repetidas veces sin razón aparente, pues se contaba con suministro de energía constante. Cuando se inspecciono el motor eléctrico de la unidad se verifico que se encontraba más allá de su temperatura normal de operación, se verifico esta lectura con el aviso de emergencia que se mostraba en el variador en el panel de fuerza, cuando se verifico los parámetros de operación ingresados al variador se observó que se había seleccionado la frecuencia de operación en 50hz, típica para las instalaciones en EE.UU., se modificó dicho parámetro en el variador y con ello se

recuperó la operación normal de la unidad de accionamiento del mecanismo del espesador de pasta.



Figura 43: Variador de frecuencia de la unidad de accionamiento

A pesar de las dificultades del proyecto por ubicación, los desafíos que planteaba probar los distintos escenarios de alimentación requeridos por Nexa en tan corto tiempo, la falta de personal e inexperiencia en este tipo de estudios se logró finalizar con éxito el estudio piloto, se cumplió con los objetivos planteados por el cliente y el proyecto evolucionó a factibilidad considerando la tecnología de espesamiento de pasta de Westech Inc. como la apropiada para las condiciones de la unidad minera El Porvenir.

Desde un punto de vista comercial, el proyecto terminó exitosamente en gran medida por el nivel de satisfacción entregada al cliente, no solo en actividades relacionadas a la operación de la planta piloto en sí, sino también a las propuestas ofrecidas en torno a la gestión de todo su sistema de gestión de relaves y la gestión de sus recursos hídricos.

Durante la campaña piloto, los encargados de Nexa ofrecieron al líder de proyecto un recorrido por toda la unidad minera compartiendo su problemática en el abastecimiento y gestión de sus recursos hídricos, se ofrecieron propuestas y observaciones que fueron muy valoradas, se podría argumentar que este tipo de interacción con el cliente fomenta la confianza no solo con el profesional a cargo sino también con su representada.

Se tiene previsto el inicio de operaciones del equipo capital en el 2023, con un costo aproximado de 1'200,000 dólares solo en equipamiento.



Figura 44: Planta piloto de pasta

V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. Conclusiones

- Los conocimientos ofrecidos por los tres departamentos académicos de la facultad de ingeniería agrícola, le permite al egresado liderar con éxito proyectos y servicios en saneamiento, tratamiento de efluentes industriales y equipos de sedimentación industrial para minería.
- Los conocimientos ofrecidos por los tres departamentos académicos de la facultad de ingeniería agrícola le permiten al egresado desenvolverse como la fuerza comercial de la organización en donde labore, para equipos de saneamiento, tratamiento de efluentes industriales y equipos de sedimentación industrial para minería
- Los conocimientos ofrecidos por los tres departamentos académicos le dan una ventaja competitiva al egresado frente a otras especialidades para afrontar con éxitos proyectos de saneamiento, tratamiento de efluentes industriales y equipos de sedimentación industrial para minería

5.2. Recomendaciones

- La no especialización en algunos de los tres departamentos académicos puede ser una ventaja en el entorno laboral correcto.
- La difusión de las oportunidades laborales a los estudiantes debería ser rol de los egresados, con el fin de sumar profesionales a su campo y poner en valor la carrera profesional.

VI. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Bernard Aubé, P. (2004). The Science of Treating Acid Mine Drainage and Smelter Effluents. Québec, Canada, H9X 4A9

Concha, F. (2014). Solid-Liquid Separation in the Mining Industry. Switzerland. Springer. pp. 173-177

Presidencia de la Republica de Perú. (21, agosto 2010). Aprueban Límites Máximos Permisibles para la descarga de efluentes líquidos de Actividad Minero – Metalúrgica. Decreto Supremo N° 010-2010. <https://sinia.minam.gob.pe/normas/aprueban-limites-maximos-permisibles-descarga-efluentes-liquidos>

Presidencia de la Republica de Perú. (7, marzo 2010). Aprueba Límites Máximos Permisibles para los efluentes de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales Domésticas o Municipales. Decreto supremo N° 003-2010. http://www.minam.gob.pe/wp-content/uploads/2013/09/ds_003-2010-minam.pdf

Presidencia de la Republica de Perú. (7, junio 2017). Aprueban Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para Agua y establecen Disposiciones Complementarias. Decreto Supremo N°004-2017. <http://www.minam.gob.pe/wp-content/uploads/2017/06/DS-004-2017-MINAM.pdf>

Presidencia de la Republica de Perú. (9, mazo 2019). Decreto Supremo que aprueba el Reglamento de Valores Máximos Admisibles (VMA) para las descargas de aguas residuales no domésticas en el sistema de alcantarillado sanitario. Decreto Supremo N°010-2019. https://cdn.www.gob.pe/uploads/document/file/306588/DS_010-2019-VIVIENDA.pdf